



Entwurf und Aufbau
effizienter Zustandsdiagnostik
für das Booster-Synchrotron Bodo



Dissertation zur Erlangung
des Grades eines Doktors
der Naturwissenschaften

Fachbereich Physik
Universität Dortmund

vorgelegt von
Andreas Lüdeke

1. Referent : Prof. Dr. T. Weis
2. Referent : Prof. Dr. D. Husmann
Vertreter der wissenschaftlichen Mitarbeiter: Dr. K. Wacker

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Anlagensteuerung	7
1.1	Aufgaben einer Anlagensteuerung	7
1.1.1	Modellierung einer Maschine	8
1.1.2	Datenakquisition	10
1.1.3	Zustandsbewertung	11
1.2	Steuerungskonzepte	14
1.2.1	Darstellungsebene	15
1.2.2	Netzwerkkommunikation	17
1.2.3	Prozeßebene	18
1.2.4	Feldbus- und Ein-/Ausgabesysteme	19
1.3	Definition einer effizienten Anlagensteuerung	19
2	Steuerung und Diagnostik von Beschleunigern	21
2.1	Steuerung von Großanlagen	21
2.2	Komplexität von Ringbeschleunigern	22
2.3	Diagnose von Beschleunigerzuständen	23
2.3.1	Charakterisierung von Teilchen in Ringbeschleunigern .	23
2.3.2	Meßmethoden der Strahlparameter	28
2.3.3	Messung dynamischer Größen	35
2.4	Effiziente Steuerung von Beschleunigeranlagen	36
2.4.1	Gütemaße der Effizienz eines Beschleunigers	36
2.4.2	Steuerungseffizienz bei Beschleunigeranlagen	40

3	Die Dortmunder Elektronen-Testspeicherringanlage DELTA	41
3.1	Zielsetzung und Aufbau von DELTA	41
3.2	Der Linearbeschleuniger	43
3.3	Der Akkumulationsprozeß an DELTA	43
3.3.1	Injektion in den Booster	43
3.3.2	Teilchentransfer vom Booster zum Speicherring	44
3.4	Das Booster-Synchrotron Bodo	44
3.4.1	Aufgaben des Boosters	44
3.4.2	Designaten von Bodo	45
3.4.3	Dynamik des Boosters	47
3.5	Der Speicherring Delta	50
3.6	Das DELTA Kontrollsystem	51
3.6.1	Software-Architektur	51
3.6.2	Hardware	53
4	Konzept für die Steuerung und Diagnostik von Bodo	55
4.1	Spezielle Anforderungen an das Konzept im Rahmen von DELTA	55
4.2	Parametrisierung des Akkumulationsprozesses	56
4.2.1	Dynamische Sollzustände	56
4.2.2	Definition der Gütefunktionen	58
4.2.3	Reproduktion von Maschinenzuständen	59
4.3	Diagnostik für den Akkumulationsprozeß	60
4.3.1	Diagnose von Gerätefehlern	60
4.3.2	Diagnose der Gütefunktionen	61
4.3.3	Diagnostik zur Analyse des Akkumulationsprozesses	61
4.4	Aufgabenorientierte graphische Benutzeroberflächen	63
4.4.1	Der Akkumulationsservice	63
4.4.2	Die Akkumulationsanalyse	64
4.4.3	Allgemeine Service-Applikationen	64
4.4.4	Konsistente Darstellung des Gerätezugriffs	66

5	Realisierung des Konzeptes an DELTA	67
5.1	Parameter des Akkumulationsprozesses	67
5.1.1	Rampendefinition und Initialisierung	67
5.1.2	Gütemaße	69
5.1.3	Sicherung und Wiederherstellung von Maschinenzuständen	69
5.1.4	Ablaufsteuerung der Akkumulation	70
5.2	Realisierung der Gerätediagnostik	72
5.2.1	Dynamische Messung der Hochfrequenzleistung	72
5.2.2	Soll-/Istwert Vergleich der Rampennetzgeräte	74
5.3	Diagnostik zur Bestimmung der Strahlparameter	74
5.3.1	Orbitmessung	74
5.3.2	Arbeitspunktmessung im Booster	78
5.3.3	Strahlstrommessungen	80
5.3.4	Booster Chromatizitätsmessung	81
5.3.5	Booster Optikmessung	82
5.4	Aufgabenorientierte graphische Benutzeroberflächen	83
5.4.1	Ablaufsteuerung der Akkumulation	84
5.4.2	Darstellung der Gütemaße	85
5.4.3	Darstellung des Orbits	86
5.4.4	Darstellung der Arbeitspunkte	88
5.4.5	Anzeige des Maschinenzustandes	89
5.4.6	Setup-Browser	90
5.4.7	Generische Gerätegruppensteuerung	92
6	Analyse eines Boosterzyklus	95
6.1	Rampenerstellung	95
6.2	Messung der Optik	96
6.3	Messung der Chromatizität	101
7	Zusammenfassung und Ausblick	103
	Abbildungsverzeichnis	104
	Literaturverzeichnis	107

Einleitung

Die Forschung hat in den letzten Jahrzehnten eine kontinuierliche Entwicklung zu immer größeren Projekten von zunehmender Komplexität erfahren. Moderne Großforschungsprojekte wie Beschleunigeranlagen oder große Spiegelteleskope benötigen ein hoch komplexes Steuersystem, das ihre Bedienung und die Verwaltung der Meßdaten ermöglicht. Die Effizienz der gesamten Anlage kann dabei entscheidend von einem sorgfältigem Design der Anlagensteuerung abhängen.

In der Informationstechnologie beschäftigt sich ein eigener Zweig mit den Kriterien zur Konzeption effizienter Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine. Eine Umsetzung dieser Kriterien auf die Steuerung einer Großanlage bedarf jedoch auch der detaillierten Analyse der Steuerungsprozesse, d.h. genauer Kenntnisse über die Funktionsweise der Anlage, die es zu steuern gilt. Außerdem gibt es eine Rückwirkung des Designs der Benutzerschnittstelle auf das Design der Anlage. So muß vor allem in dem Entwurf der Diagnostik einfließen, in welcher Form die Daten akquiriert werden, um eine effiziente Diagnose des Maschinenzustandes zu ermöglichen. Je komplexer die Anlage, desto schwieriger wird es auch, die Quellen von Fehlfunktionen ausfindig zu machen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die allgemeinen Methoden zum Entwurf einer effizienten Anlagensteuerung, speziell auf die Zustandsdiagnostik des Booster-Synchrotrons Bodo an der Testspeicherringanlage DELTA zu übertragen. Die Anforderungen an die Diagnostik und Steuerung einer Beschleunigeranlage werden zuerst im allgemeinen dargelegt und anschließend anhand des Boosters konkretisiert. Dazu wird zum einen die Diagnostik passend entwickelt und aufgebaut, zum anderen werden die Schnittstellen zur Steuerung der Anlage entworfen und implementiert. Dabei werden auch die besonderen

Anforderungen an die Steuerung von DELTA behandelt, die aus der Aufgabe einer Testanlage erwachsen.

Im folgenden Kapitel werden zuerst die allgemeinen Methoden dargelegt, um eine effiziente Anlagensteuerung aufzubauen. Im Kapitel 2 werden diese Methoden auf die Diagnose und Steuerung eines Teilchenbeschleunigers übertragen. Im 3. Kapitel wird die Anlage DELTA vorgestellt und im darauffolgenden Kapitel ein Entwurf für den Aufbau der Anlagensteuerung und Diagnostik des Boosters Bodo entwickelt. Kapitel 5 stellt die Realisierung dieses Konzeptes an DELTA vor. Das abschließende Kapitel widmet sich den Anwendungen der Diagnostik zur Charakterisierung des Boosters.

Kapitel 1

Grundlagen der Anlagensteuerung

Im Folgenden werden die Aufgaben einer Anlagensteuerung erläutert und die Konzepte dargestellt, nach denen moderne Anlagensteuerungen strukturiert werden. Daran anschließend wird die Bedeutung des Begriffes Effizienz in Bezug auf Anlagensteuerungen eingegrenzt.

1.1 Aufgaben einer Anlagensteuerung

Mit den technischen Möglichkeiten der Anlagensteuerung wachsen auch die Erwartungen an das Steuersystem. Während in den Anfängen der Anlagensteuerung im wesentlichen eine „Fernsteuerung“ der Anlage im Vordergrund stand, so stehen mittlerweile weit darüberhinausgehende Ziele im Mittelpunkt. So soll die Maschinensteuerung eng mit der Datenaquisition und -verarbeitung verknüpft werden. Des weiteren wird zunehmend die Modellierung der Anlage direkt in die Steuerung integriert. D.h. es wird immer mehr Expertenwissen über die Anlage in die Steuerung integriert, so daß dem Operateur die Modellierung des Systems und die Interpretation der Daten weitestgehend abgenommen wird.

Im folgenden Abschnitt wird zuerst das Modell der *State-Machine* beschrieben, welches ermöglicht, allgemein die Zustände einer Maschine zu charakterisieren und erlaubte Übergänge zwischen diesen zu definieren. Da eine reale Maschine jedoch in ihrem Verhalten immer Abweichungen zum Maschinenmodell aufweisen wird, benötigt man zusätzlich eine Zustandsdiagnose, um diese Abweichungen festzustellen und gegebenenfalls korrigieren zu können. Dabei genügt nicht nur die Aufnahme von Diagnosedaten, es muß auch eine geeignete Aufbereitung der Daten stattfinden, die ihre Beurteilung erlaubt. Das kann über eine entsprechende Visualisierung der Daten geschehen, die eine intuitive Bewertung durch den Maschinenoperator erlaubt. Für die Optimierung der Maschine ist jedoch auch eine funktionale Bewertung der Daten notwendig, d.h. man benötigt ein Gütemaß, welches die Meßdaten in eine Bewertung des Maschinenzustandes verarbeitet.

1.1.1 Modellierung einer Maschine

Maschinenzustände lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: Istzustände und Sollzustände. Ein Sollzustand wird für die Maschinensteuerung als Vorgabe verwendet. Für eine ideale Maschine folgt der Istzustand der Maschine seinem Sollzustand. Bei realen Maschinen kann das aufgrund ihrer Toleranzen nicht vorausgesetzt werden, woraus sich die Notwendigkeit ergibt, den Istzustand zu messen.

Bei beiden Kategorien erweist sich eine Unterscheidung nach *elementaren* Zuständen und *abstrahierten* Zuständen als praktisch. Während erstere die technischen Einzelzustände der Subkomponenten darstellen, wird bei letzteren über ein Modell der Maschine ein übergeordneter Zustand zugewiesen. Z.B. ist für die Magnete eines Ringbeschleuniger der elementare Sollzustand eine Tabelle der Sollströme, während der äquivalente *abstrahierte* Zustand dazu lauten kann „Standard-Optik bei 1 GeV“.

Zur Beschreibung von Maschinenzuständen und den möglichen Übergängen zwischen diesen Zuständen ist aus der strukturierten Analyse das Modell der *Finite-state-machines* (im Folgenden einfach *State-machines* genannt) bekannt [Simm94]. Es dient der Analyse von Prozessabläufen, und kann ebenfalls für die Modellierung ihrer Steuerung verwendet werden.

Definition „State-machine“: Eine *State-machine* ist definiert durch einen endlichen Satz von Zuständen (*States*) und einer Tabelle von erlaubten Übergängen zwischen diesen Zuständen (*State-transition-table*) sowie den Ereignissen (*Events*) und/oder Bedingungen (*Conditions*), die diese Übergänge auslösen.

Zur Darstellung von *State-machines* werden häufig auch *State-transition-diagrams* verwendet, welche die Informationen über die *State-machine* graphisch darstellen. Zur Verdeutlichung soll als kleines Beispiel die Steuerung eines Netzgerätes über eine *State-machine* beschrieben werden.

Beispiel: Ein Netzgerät habe einen Ein/Ausschalter (*switch*), einen Spannungsregler (*input*), und einen Ausgang (*output*). Im einfachsten Fall läßt sich das Netzgerät durch zwei *States* beschreiben: *power_on* und *power_off*. Es existieren nur zwei Events, auf die die *State-machine* reagieren

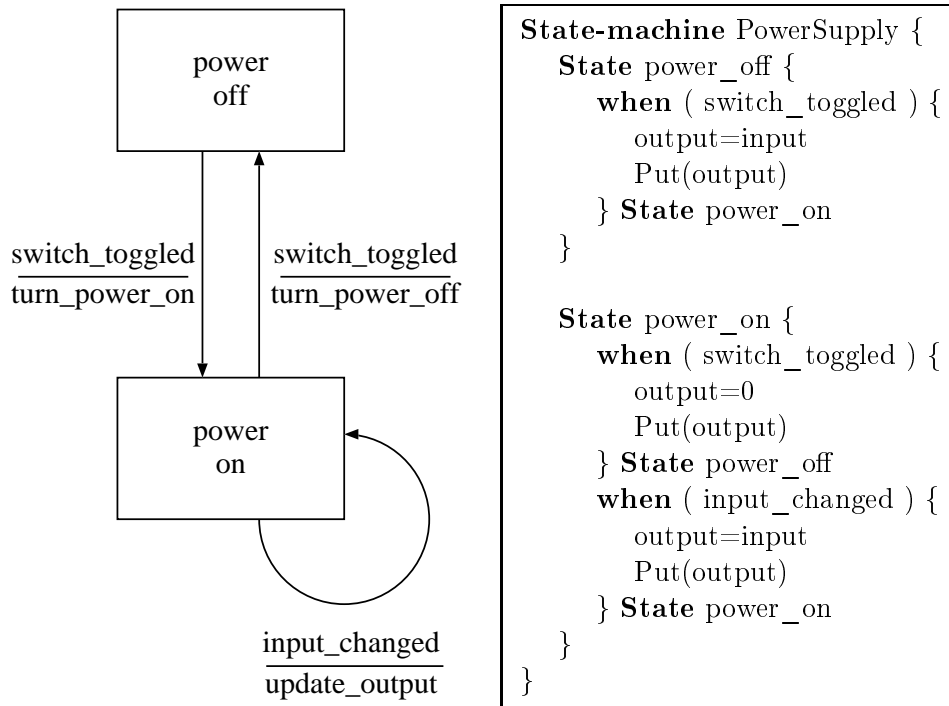


Abbildung 1.1: Am Beispiel eines Netzgerätes sind die Darstellungen als *State-transition-diagramm* und als Programm in einer *State-notation-language* gegenübergestellt. Im Diagramm erkennt man die *States* in den rechteckigen Kästen und die erlaubten *transitions* sind als Pfeile zwischen diesen Kästen dargestellt. An den Pfeilen ist vermerkt, welches Ereignis oder welche Bedingung den Übergang auslöst (oberhalb des Striches) und welche Aktion dabei ausgelöst wird (unterhalb des Striches). Aus dem Programm sind zusätzlich auch die Abläufe der Aktionen (*actions*) ersichtlich. Zur Umsetzung in ein Steuerprogramm fehlt nur noch die Zuordnung der *events* und der Parameter zu Eingabe/Ausgabe Kanälen der Hardware.

muß: Eine Änderung des Eingangs (*input_changed*) und eine Betätigung des Schalters (*switch_toggled*). Die *State-machine* ist in Abb. 1.1 durch ein *State-transition-diagramm* und als Programm in einer *State-notation-language* (angelehnt an [Kozu95]) dargestellt.

Diese Art von Modellierung einer Anlage läßt nicht nur eine klare Gliederung der Prozeßabläufe zu, sie ermöglicht außerdem eine Beschreibung des

zeitlichen Ablaufs eines Steuerungsprozesses. Das ist wichtig für die Modellierung von *Echtzeit-Prozessen*, bei denen für die Steuerung gewisse Reaktionszeiten garantiert werden müssen. Diese Eigenschaften haben zu einer weiten Verbreitung des *State-machine* Modells in der Anlagensteuerung geführt. So ist z.B. unter dem EPICS Kontrollsystem (siehe Abschnitt 1.2) die Möglichkeit gegeben, Prozeßabläufe direkt in einer *State-notation-language* zu formulieren, von einem *State-notation-compiler* in Maschinencode zu übersetzen und in die Anlagensteuerung zu integrieren [Kozu95].

1.1.2 Datenakquisition

Die Diagnostik einer Maschine dient dazu, ihre Funktionstüchtigkeit zu überprüfen und Abweichungen vom gewünschten Zustand festzustellen. Quellen für diese Abweichungen können Gerätefehler sein, aber auch Modellfehler wie der Einfluß von Störgrößen oder Nichtlinearitäten der Maschine.

Für den theoretischen Fall einer völlig fehlerfreien, linearen Maschine wäre der Gesamtzustand komplett durch die gesetzten Stellgrößen ihrer Maschinenkomponenten gegeben. Aber schon bei fehlerfreier Steuerung können nichtlineare Maschinen stark von ihrer Vorgeschichte abhängen, zum Beispiel von Hysterese-Effekten, d.h. der Reihenfolge oder Geschwindigkeit, in der die Einzelgeräte ihren Zustand eingenommen haben. Außerdem kann der Einfluß von Störgrößen auf die Maschine nie vollständig berücksichtigt werden.

Somit kann sich die Datennahme nicht auf die Maschinendiagnose beschränken, sie muß auch auf das Produkt der Maschine ausgeweitet werden. Aus der Bewertung des Produktes ergibt sich eine Bewertung des Maschinenzustandes, die genutzt werden kann, um Abweichungen des Maschinenzustandes vom Sollzustand festzustellen und zu kompensieren.

Maschinendiagnose

Die Diagnose der Maschine ist eindeutig gegliedert nach den Einzelgeräten. Jede Maschine läßt sich in Funktionsgruppen zerlegen, die eventuell in weitere Untergruppen zergliedert werden können bis zum Einzelgerät. Insofern ist die Auswirkung eines Gerätefehlers auf die übergeordneten Funktionsgruppen beschränkt.

Je nach Gerät sind eine Fülle verschiedener Fehlfunktionen möglich. Deswegen sollte eine Fehlfunktion durch das Gerät selbst erkannt und in Form einer Status Meldung an den Operateur gesendet werden. Wo dies nicht der Fall ist, kann in der Regel eine maximal erlaubte Toleranz der Abweichung des Sollwertes vom Istwert definiert werden und als Indikator einer Fehlfunktion dienen. Besondere Anforderungen ergeben sich dabei für dynamische Größen. Einer Änderung des Sollwertes wird nicht unmittelbar eine Änderung des Istwertes folgen, d.h. neben einer statischen muß eine dynamische Toleranz definiert werden, die die Trägheit des Gerätes bei Änderungen seines Sollwertes berücksichtigt. Außerdem muß bei Sollwertkurven gegebenenfalls sichergestellt werden, daß der Istwertverlauf synchron zum Sollwertverlauf liegt. Gleiches gilt für gepulste Komponenten. Hier muß eine Auslese der echten Pulshöhe zusammen mit dem Pulszeitpunkt erfolgen, um eine Fehlfunktion ausschließen, bzw. anzeigen zu können.

Produktdiagnose

Die Messung der Produkteigenschaften ist Voraussetzung für die Bewertung eines Maschinenzustandes. Sie kann direkt für die Optimierung eben dieser Eigenschaften genutzt werden, auch ohne ein Modell des Produktionsprozesses zu verwenden. Die Messung ermöglicht zudem Rückschlüsse auf den Einfluß von Störgrößen und Nichtlinearitäten auf den Zustand der Maschine. Ebenso können Fehlfunktionen, welche eventuell nicht durch die Maschinendiagnose erfaßt werden, durch die Produktdiagnose lokalisiert werden.

1.1.3 Zustandsbewertung

Nur in wenigen Fällen wird ein Operateur bereits aus den gemessenen Rohdaten eine Bewertung des aktuellen Maschinenzustandes vornehmen können. Für die Aufbereitung des Maschinenzustandes gibt es dabei zwei unterschiedliche Zielsetzungen: Entweder kann eine Datenverarbeitung darauf abzielen, dem Operateur eine intuitive Bewertung des Maschinenzustandes durch eine geschickte Visualisierung der Daten zu ermöglichen. Oder die Datenaufbereitung kann, indem sie Expertenwissen beinhaltet, bereits die Bewertung der Daten einschließen, so daß dem Operateur nur noch ein Maß für die Qualität des Zustandes übermittelt werden muß. Diese beiden Ansätze, welche in der Regel parallel für Zustandsbewertungen genutzt werden, sollen in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

Daten-Visualisierung

Um einen Maschinen-Istzustand dem Maschinenoperator mitzuteilen und ihm die Bewertung der Daten zu ermöglichen, ist eine geeignete Aufbereitung der Daten notwendig. Dabei kann man zwischen technischer und physikalischer Datenaufbereitung unterscheiden. Erstere sollte die elementaren Zustände der Einzelgeräte im Zusammenhang mit ihren Spezifikationsgrenzen darstellen. In der Regel wird die Visualisierung in direkter Verbindung mit der Steuerung des Einzelgerätes stehen. So kann dieses Gerät unabhängig vom Rest der Maschine betrieben und getestet werden. Bei der physikalischen Visualisierung geht es darum, den Gesamtzustand der Maschine möglichst übersichtlich darzustellen. Die elementaren Datenmengen eines Maschinenzustandes sind z.T. so hoch, daß eine Zahl nur geringe Aussagekraft hat und der graphischen Aufbereitung große Bedeutung zukommt. Multidimensionale Datenmengen lassen sich entweder durch Ausnutzung aufwendiger computer-technischer Möglichkeiten direkt darstellen, z.B. ermöglicht eine dreidimensionale, bewegte Farbgraphik die Darstellung 5-dimensionaler Datenmengen [Abel90]. Als Beispiel sei die zeitliche Entwicklung eines dreidimensionalen Temperaturprofils genannt, bei welchem die Farbe zur Kennzeichnung der Temperatur verwendet wird. Im allgemeinen ist es jedoch sinnvoller, geeignete Schnitte durch die Datenmenge darzustellen.

Die Darstellung von Korrelationen zwischen Maschinenparametern und Produkteigenschaften ist ein wichtiges Hilfsmittel, um die verwendeten Modelle zu überprüfen, Modellparameter zu bestimmen und eventuell systematische Fehler des Maschinenmodells aufzuspüren.

Als allgemeiner Leitfaden für die Darstellung von Daten werden in [Shne98] fünf Regeln angegeben:

Konsistente Darstellung: Gleiches sollte auch gleich dargestellt werden. Z.B. sollte ein besonderer Zeitpunkt in den verschiedenen Daten-Visualisierungen immer auf die gleiche Art gekennzeichnet werden; ein Fehler sollte in allen Programmen durch die gleiche Farbe (i.a. rot) angezeigt werden.

Effiziente Datenübermittlung an den Benutzer: Kompakte Darstellungen verwenden, die es erlauben in einen Blick alle wesentlichen Daten zu erfassen. Nur Daten, die der Anwender benötigt sollten auch angezeigt werden.

Minimale Belastung des Gedächtnisses des Nutzers: Die Bedienung der Programme sollte intuitiv sein und sich ähneln. Gleiche Bedienfunktionen, wie laden oder speichern, sollten unter gleichen Namen in ähnlichen Menüs stehen. Aus einer Bedienoberfläche eines Gerätes sollten wichtige Eckdaten des Gerätes und Standard-Bedienungsabläufe unmittelbar ersichtlich sein.

Kompatibilität der Daten-Darstellung mit der Eingabe: Soll- und Istwerte sollten in gleicher Formatierung und gleichen Einheiten dargestellt werden, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen.

flexible Daten-Darstellung: Die Datensichten sollten den unterschiedlichen Aufgaben und den unterschiedlichen Benutzern angepaßt werden können.

Qualitätsmaße

Qualitätsmaße sind Voraussetzung für die Optimierung eines Systemzustandes. Für diese Optimierung benötigt man die Definition eines Qualitäts- oder Gütemaßes, das den Systemzustand auf eine geordnete Menge, z.B. die Reellen Zahlen abbildet. Nur so lassen sich „Verbesserungen“ am System überhaupt erst definieren und diagnostizieren. Für eine Optimierung muß zusätzlich das absolute Maximum oder Minimum des gewählten Gütemaßes gefunden werden (ob Maximum oder Minimum hängt nur von der Definition des speziellen Gütemaßes ab) [Föll88]. Eine Verbesserung des Systems stellt erst dann eine Optimierung dar, wenn es sich um die größtmögliche Verbesserung unter den technischen Randbedingungen des Systems handelt. Diese strenge Definition ist natürlich in der Praxis selten zu halten, da in der Regel nicht alle Einflüsse bekannt sind. Sie macht aber deutlich, daß eine Optimierung die vorherige Analyse des Systems bedingt, d.h. die Untersuchung, welche Güte man unter den technischen Randbedingungen erreichen sollte.

Während die Analyse und Optimierung des Systems immer eine Modellierung voraussetzt, ist eine Verbesserung nach dem Gütemaß auch ohne ein Systemmodell möglich. In der Praxis haben sich sogenannte *heuristische* Optimierungen bewährt die ohne Systemmodell auskommen, um eine vorgegebene Gütefunktion zu minimieren. Dazu zählen Regler, die auf Neuronalen Netzen basieren. Diese Netze sind in der Lage, Verknüpfungen zwischen Steuergrößen

und Bewertungsfunktionen an Beispielen zu erlernen, ohne daß das zu regelnde System vorher modelliert wird (z.B. [Nauc96]). Sogenannte Fuzzy-Regler arbeiten mit kontinuierlichen Bewertungen, wie z.B. „gute“, „akzeptable“ und „schlechte“ Zustände, die nicht durch diskrete Grenzen voneinander getrennt sind, sondern fließend ineinander übergehen (z.B. [Krus95]).

1.2 Steuerungskonzepte

Mit der Entwicklung von Großanlagen, wie z.B. Beschleunigern, Teleskopen oder Kernreaktoren, entwickelten sich auch die Konzepte für die Steuerung solcher Anlagen. Als Basis hat sich bis Anfang der 90er weitgehend das sogenannte „Standard-Modell“ [Bier93b] der Anlagensteuerung durchgesetzt (siehe Abb. 1.2), das sich im wesentlichen in drei Ebenen gliedern läßt:

- Darstellungsebene
- Prozeßebene
- Geräteebene

Von der Darstellungsebene aus bedient der Operateur die Anlage, hier werden Daten visualisiert und der Zustand der Anlage angezeigt. Durch ein Netzwerk sind diese Rechner mit denen der Prozeßebene verbunden. Auf der Prozeßebene laufen die Programme, welche für die Steuerung der einzelnen Komponenten verantwortlich sind. Hier wird der Zugriff auf die Geräte geregelt und die Diagnose-Rohdaten werden in einheitliche Datenformate umgewandelt. Alles Detailwissen über die Geräte und die Diagnostik sollte auf dieser Ebene angesiedelt sein, so daß sich von Seiten der Darstellungsebene alle Geräte nach der gleicher Methode ansprechen lassen. Die Prozeßrechner sind wiederum über verschiedene Feldbusse oder spezielle Ein-/Ausgabe-Leitungen mit den zu steuernden oder auszulesenden Geräten verbunden.

Die Einigung auf diese Kontrollsystemarchitektur im Bereich der Großexperimente ermöglichte, spezielle Software-Baukästen, auch *Toolkits* genannt, für Großanlagensteuerungen zu entwickeln. Das erste Toolkit welches größere Verbreitung gefunden hat ist EPICS – das Experimental Physics and Industrial Control System [EPIC99]. Es wurde ursprünglich als „Ground

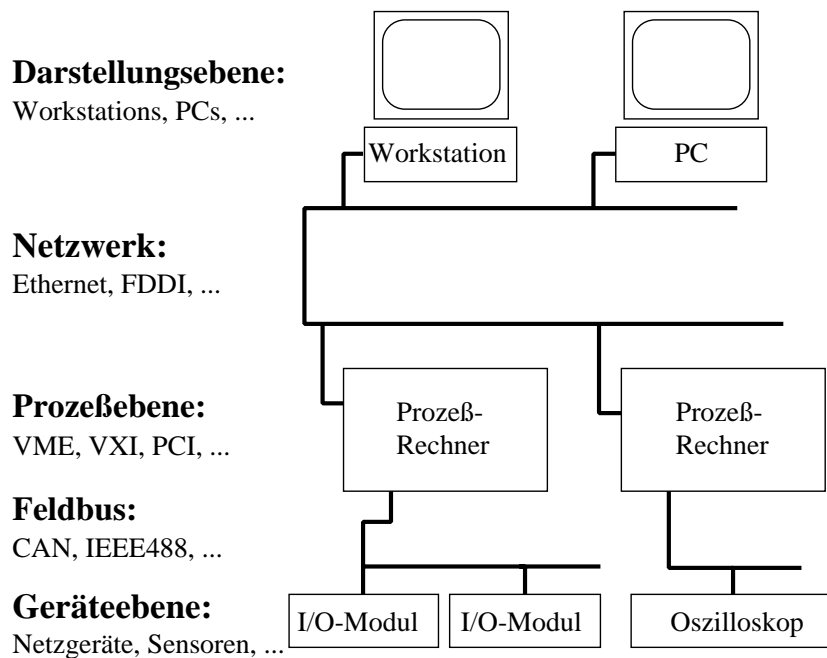


Abbildung 1.2: Das Standard-Modell der Anlagensteuerung.

Test Accelerator Control System“ (GTACS) am Brookhaven Laboratory entwickelt [Kozu89] und in Kollaboration mit der Advanced Photon Source unter dem Namen „EPICS“ weiterentwickelt. Der Kollaboration gehören mittlerweile über 40 Forschungseinrichtungen aus verschiedenen Bereichen an.

An der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) wurde das TACO Toolkit entwickelt [TACO99]. Es ist wie EPICS für den Aufbau von Kontrollsystemen nach dem Standard-Modell konzipiert und beinhaltet ebenfalls weitreichende Softwaremodule für die verschiedenen Kontrollsystemebenen. In den folgenden Abschnitten werden die von den beiden Toolkits zur Verfügung gestellten Möglichkeiten als Beispiele herangezogen.

1.2.1 Darstellungsebene

In der Darstellungsebene werden in der Regel Workstations oder PCs eingesetzt. Auf dieser Ebene laufen graphische Benutzeroberflächen zur Steuerung

der Anlage. In den letzten Jahren wurden immer neue Werkzeuge entwickelt, um auf einfache Weise graphische Benutzeroberflächen entwerfen und umsetzen zu können. Neben speziellen *GUI-Buildern* – kommerzieller Software die den graphischen Entwurf der Benutzerschnittstellen (engl.: Graphical User Interfaces) ermöglicht – werden auch verstärkt Programmiersprachen verwendet, die umfangreiche Methoden zur Erzeugung von Benutzeroberflächen zur Verfügung stellen. Zwei weit verbreitete Sprachen, welche für eine Vielfalt von Betriebssystemen und Rechnertypen zur Verfügung stehen, sind *Java* [Sun99] und *Tcl/Tk* [Oust95]. Bei *Java* handelt es sich um eine objektorientierte Compiler-Programmiersprache der Firma SUN-Microsystems, welche vor allem durch ihre Verwendung für Internet-Präsentationen große Verbreitung gefunden hat. Durch ihre objektorientierten Methoden eignet sie sich gut für mittlere bis große Softwareprojekte mit hohen Anforderungen an die Performance. *Tcl/Tk* ist eine Interpretersprache, die sich hervorragend für die Umsetzung von kleineren Projekten eignet, da sie nur sehr kurze Entwicklungszyklen benötigt und bereits nach kurzer Einarbeitung leicht zu handhaben ist. Als neuere Entwicklung wird mit der Erweiterung „*Increment Tcl*“ auch objektorientiertes Programmieren ermöglicht. Bei Verwendung von PCs in der Darstellungsebene hat man eine reichhaltige Auswahl an Programmiersprachen welche die Erstellung von graphischer Benutzeroberflächen unterstützen (*Visual C++*, *Visual Basic*, *Delphi* ...). Neben diesen allgemeinen Programmiersprachen gibt es auch speziell für die Anlagensteuerung konzipierte Werkzeuge zur Erstellung graphischer Benutzeroberflächen. Z.B. ermöglicht das Programm „*Labview*“, eine kommerzielle Software für kleine und mittlere Steuerungsaufgaben, die einfache Erstellung von graphischen Benutzerschnittstellen, wobei die Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung der Daten sehr umfangreich sind. Dieses Programm ist jedoch nur für den Laboreinsatz und nicht für die Verwendung in einem verteilten Kontrollsystem nach dem Standard-Modell ausgelegt.

Innerhalb des EPICS Toolkits werden verschiedene Optionen für das Design graphischer Benutzeroberflächen zur Verfügung gestellt. So gibt es sogenannte *Window-Manager*, welche ähnlich zu den *GUI-Buildern* den graphischen Entwurf mittels „drag & drop“ Mechanismen erlauben. Im Unterschied zu diesen stellen die *Window-Manager* gleich die Verbindung zu den Geräten und damit die Funktionalität der Oberflächen zur Verfügung. Die *Window-Manager* benutzen ihrerseits Graphikbibliotheken, wie *Java*, *X-Lib* [XOrg99] oder *Motif* [Open99]. Eine andere Option, die auch bei TACO besteht, ist die

Erweiterung der graphischen Programmiersprachen um Schnittstellen zu den Kontrollsystemen. Das ermöglicht sowohl die Nutzung kommerzieller *GUI-Builder*, wie auch das einfache Programmieren von graphischen Maschinen-Anwendungen in diesen Sprachen.

Bei der Gestaltung der Darstellungsebene sind neben den aufgeführten technischen Gesichtspunkten auch die Aspekte der Mensch-Maschine Interaktion zu berücksichtigen. So sind die unterschiedlichen Typen von Nutzern zu berücksichtigen und die verschiedenen Aufgaben, die diese mit Hilfe der Anlagensteuerung durchführen sollen. Die Nutzertypen lassen sich allgemein in drei Gruppen einteilen (angelehnt an [Shne98]):

- *Anfänger*, die wenig bis keine Erfahrung in der Bedienung der Anlage haben. Sie sind auf eine ausführliche Anleitung angewiesen, welche die notwendigen Aufgaben klar hervorhebt und die Reihenfolge der Standardprozeduren deutlich macht.
- *diskontinuierliche Nutzer*, deren Wissen über die Anlage und ihre Steuerung zwar breit ist, die jedoch nur geringes Wissen über die genauen Abläufe der einzelnen Prozesse und wenig Detailwissen präsent haben. Hier sind Hilfen auf Nachfrage wichtig und eine klare logische Gliederung der Steuerung, die es erleichtert sich die richtigen Abläufe zu merken.
- *Experten*, die alles notwendige Wissen parat haben und die ihre Aufgaben in möglichst kurzer Zeit durchführen wollen. Alle häufig benutzten Abläufe sollten für diese Nutzer zusammengefaßt über wenige Tastenkombinationen oder kurze Befehle aufgerufen werden können. Schnelle Reaktionen des Systems, knappe Rückmeldungen und direkter Zugriff auf alle Steuerungsfunktionalitäten werden erwartet.

Während es meist einfach ist, eine dieser Nutzergruppen zufriedenzustellen, so ist es weit schwieriger eine Benutzeroberfläche zu gestalten, die allen drei Gruppen gleichzeitig gerecht wird.

1.2.2 Netzwerkkommunikation

Um die Verbindung zwischen der Darstellungs- und der Prozessebene herzustellen, muß ein Zugriff über das Netzwerk ermöglicht werden. Dieser Zugriff

sollte transparent geschehen, d.h. in identischer Weise für die verschiedenen Zugriffswege. Sowohl bei EPICS als auch bei TACO ist das durch den Zugriff über einen Namen geregelt. Es werden spezielle Funktionsbibliotheken zur Verfügung gestellt, welche mittels eines Namens – bei EPICS der *Channel*, bei TACO das *Device* – den Zugriff auf die Geräte ermöglichen. Bei den Zugriffen unterscheidet man zwischen synchronen und asynchronen Zugriffen. Während erstere bei einer Anfrage auf die Antwort warten, so wird bei letzteren nur ein Prozeß ausgelöst und nicht auf seine Ausführung gewartet. Unter EPICS werden im wesentlichen asynchrone Zugriffe verwendet, was den Vorteil mit sich bringt, daß die graphischen Benutzeroberflächen nicht auf Antworten von den Geräten warten müssen, sondern mit einer ebenfalls asynchronen Nachricht von der Prozeßebene über den Status eines Prozesses informiert werden.

Ein Unterschied zwischen EPICS und TACO liegt in der Methode, wie der für ein Gerät zuständige Prozeßrechner ermittelt wird. EPICS fragt beim ersten Zugriff mittels eines sogenannten *Broadcasts* alle Rechner des lokalen Netzwerkes nach dem Gerät. Unter TACO wird grundsätzlich eine Datenbank gefragt, bei der alle Prozeßrechner ihre Geräte anmelden.

1.2.3 Prozeßebene

In der Prozeßebene soll das Wissen über die Funktionalität der Geräte stecken sowie das Wissen über den Gerätezugriff. Hier werden meist VME¹-Rechner mit Echtzeit-Betriebssystemen eingesetzt. Unter EPICS wird das Wissen über die Funktionalität in einer lokalen Datenbank in Form von sogenannten *Records* vorgehalten. Diese können wiederum mit Hilfe graphischer Tools konfiguriert werden, so daß sich auch komplizierte Funktionalitäten ohne Programmierung implementieren lassen. Die Geräte-Treiber, welche den Zugriff von der Prozeßebene auf die Geräte ermöglichen, sind als C-Programme implementiert.

TACO nutzt für die Programmierung C++-Klassenbäume, so daß für die meisten Geräte vorhandene Klassen durch Vererbung und Modifikationen einzelner Methode angepaßt werden können. Auf die gleiche Weise wird der Gerätezugriff über C++-Klassen implementiert.

¹*Versa Module Europa*, ein Anfang der 80er Jahre eingeführter IEEE-Standard für ein offenes Bussystem.

1.2.4 Feldbus- und Ein-/Ausgabesysteme

Für die Verbindung der Prozeß- mit der Geräteebene müssen auf dem Prozeßrechner Ein-/Ausgabekanäle angesteuert werden. Dabei wird in den letzten Jahren zunehmend eine Zwischenschicht eingeführt, ein sogenannter „Feldbus“. Während bei VME-Ein-/Ausgabekanälen für jedes Gerät alle Kanäle bis zum VME Rechner gelegt werden müssen, erlaubt ein Feldbus eine weitere Dezentralisierung. Mittels eines seriellen Busses, d.h. in der Regel einer Zweidraht-Leitung, werden Ein-/Ausgabemodule angesprochen, welche wiederum eine Vielzahl von Ein-/Ausgabekanälen besitzen können. So kann z.B. ein Netzgerät über ein Modul angesteuert werden, welches über einen Analogausgang (Sollwert), einen Analogeingang (Istwert) und je zwei digitale Ein-/Ausgabekanäle (Ein-/Ausschalter und Status) verfügt. Zusätzlich können mehrere Module an einen gemeinsamen Feldbus angeschlossen werden, was insgesamt den Verkabelungsaufwand erheblich reduziert. Ein weiterer Vorteil ist die zusätzliche Robustheit eines Feldbussystems. Wenn ein Prozeßrechner einen Ausfall seiner Spannungsversorgung erleidet, werden alle seine Ausgänge auf ihren Null-Wert gehen. Ein Feldbus hingegen wird durch die eigene Spannungsversorgung seiner Module alle Ausgänge auf ihren Werten halten. D.h. ein Feldbussystem ist robuster gegen Störungen, als eine direkte Ansteuerung der Geräte über VME-Ein-/Ausgabemodule.

1.3 Definition einer effizienten Anlagensteuerung

Der Begriff „Effizienz“ bezeichnet allgemein *„die Wirksamkeit im Verhältnis zu den aufgewandten Mitteln“* [Meye93]. Er wird häufig bei betriebswirtschaftlichen Kosten-/Nutzenrechnungen verwendet, hat aber auch im naturwissenschaftlich – technischen Bereich seine Entsprechung im Wirkungsgrad.

Bei der Frage nach der Effizienz einer Anlagensteuerung spielt nicht nur die Leistungsfähigkeit des Systems eine Rolle, sondern auch der Aufwand der nötig ist das System aufzubauen, zu warten und zu bedienen.

Es sollen im Folgenden verschiedene Anwendungen des Effizienzbegriffes auf eine Anlage betrachtet werden.

Anlageneffizienz: Die Steuerung sollte einen optimalen Betrieb der Anlage ermöglichen, d.h. die Durchführung der verschiedenen Aufgaben

in optimaler Weise ermöglichen. Die Kriterien für einen optimalen Betrieb müssen hierfür aus den Aufgaben der Anlage abgeleitet werden. Die Anlageneffizienz ist ein Maß dafür, wie gut eine bestehende Anlage ihre Aufgabe erfüllt und dient als Gütemaß für eine Optimierung der Anlage. Kurz: *Die Produktivität der Anlage im Verhältnis zu ihren Gesamtkosten.*

Steuerungseffizienz: Die Steuerung der Anlage sollte mit minimalem Aufwand möglich sein. Hier spielen im wesentlichen der Grad der Automatisierung, die Benutzerfreundlichkeit der Steuerung und die Qualität der Fehlerdiagnostik eine Rolle. In einer Gesamtbewertung der Anlagensteuerung müssen die unterschiedlichen Gewichte der einzelnen Steuerungsaufgaben berücksichtigt werden (*Task-profile*), sowie die unterschiedliche Verwendung durch verschiedene Nutzer (*User-profile*). D.h. *die Wirksamkeit der Steuerung im Verhältnis zum Lernaufwand des Operateurs.*

Realisierungseffizienz: Der Aufwand für die Umsetzung der Anlagensteuerung sollte ebenfalls in Relation zu dem Nutzen, wie er aus den beiden vorigen Punkten folgt, gesehen werden. Somit: *die Wirksamkeit der Steuerung relativ zum Aufwand ihrer Realisierung.*

Nach der Definition der Anforderungen müssen somit die möglichen Lösungen für eine Anlagensteuerung darauf geprüft werden, in welchem Verhältnis der Aufwand für ihre Umsetzung, Wartung und Bedienung zu ihrem Nutzen bei der Steuerung der Anlage liegt.

Kapitel 2

Steuerung und Diagnostik von Beschleunigern

Nachdem im vorherigen Kapitel die Grundlagen für den Aufbau effizienter Anlagensteuerungen besprochen wurden, soll nun konkret auf die Besonderheiten bei der Steuerung und Diagnostik von Teilchenbeschleunigern eingegangen werden.

2.1 Steuerung von Großanlagen

Man kann verschiedene Phasen im Betrieb einer Anlage unterscheiden. Zuerst werden in einer Aufbauphase alle Teile der Anlage voneinander isoliert getestet. Dann wird in einer Inbetriebnahmephase ihr Zusammenspiel überprüft. Ist diese Phase abgeschlossen, so steht die Anlage für ihren eigentlichen Bestimmungszweck zur Verfügung. Diese Phase soll hier allgemein Produktionsphase genannt werden. Letztlich endet diese Phase dann mit der Demontage oder Umwandlung der Anlage für einen anderen Bestimmungszweck.

Bei Großanlagen ändern sich die Anforderungen an ihre Steuerung mit den unterschiedlichen Betriebsphasen stark.

In der Aufbauphase ist von der Anlagensteuerung meist nur ein einfacher Zugriff auf die Geräte gefordert – vielfach nicht einmal das, da die Einzelgeräte bei ihrer Inbetriebnahme in der Regel von Hand gesteuert werden. Allerdings sollte für den Test der Gerätespezifikationen eine ausreichende Ansteuerung gewährleistet sein. In dieser Phase sollte auch die Kalibration der Maschinendiagnostik erfolgen und die Funktionalität der Einzelgeräte über die Anlagensteuerung implementiert werden. Das beinhaltet die Schnittstellen vom Steuerrechner zum Gerät, sowie die *State-Machines* der Geräte, inklusive der Status-Funktionen.

Die Inbetriebnahmephase stellt bereits höchste Anforderungen an die Anlagensteuerung. In dieser Phase benötigt man bereits vollständige Kontrolle

der Maschine, ohne daß alle Eigenschaften der Maschine vollständig bekannt sind. Die Diagnostik muß in dieser Phase nicht nur beim aufspüren statistischer Fehler helfen, sondern auch bei systematischen Fehlern, wie einem fehlerhaften Design oder bei Konstruktionsmängeln. Zur Verkürzung dieser Phase ist eine sehr flexible Steuerung hilfreich ebenso wie eine umfangreiche Diagnostik die es erlaubt, alle Fehler bis an ihre Quelle zurückzuverfolgen. Hierbei benötigt man einerseits die gesamte Produktdiagnostik, muß andererseits aber auch die diagnostischen Rohdaten untersuchen, um Fehler bei der Digitalisierung und Verarbeitung dieser Daten auszuschließen. Zielsetzung ist dabei die Optimierung der Anlageneffizienz. Dazu gehört auch bereits eine sukzessive Automatisierung aller wichtiger Prozeßabläufe, sofern dies unter vertretbarem Aufwand realisierbar ist.

Für die eigentliche Produktionsphase liegen die Anforderungen an die Steuerung und Diagnostik dann vor allem bei der Steuerungseffizienz. Zielsetzung sollte eine weitestgehende Automatisierung der gesamten Anlage sein und die Bereitstellung aufgabenspezifischer, kompakter Benutzeroberflächen, die eine korrekte Steuerung auch durch diskontinuierliche Nutzer und Anfänger erlauben.

2.2 Komplexität von Ringbeschleunigern

Aufgrund der hohen Zahl an Einzelkomponenten und ihrer vielfachen, häufig nichtlinearen Wechselwirkungen gehören Ringbeschleuniger heute zu den komplexesten zu steuernden Großanlagen [Isgö96]. Ihre Modellierung für die Steuerung und Optimierung geht in der Regel von stark vereinfachenden Modellen aus, die meist nur in einem beschränkten Parameterbereich gültig sind. So wird eine Strahllagekorrektur z.B. bei der Strahllagemessung die Ablagen nach einer Näherungsformel berechnen (siehe auch Abschnitt 2.3.2) und etwaige Nichtlinearitäten oder Hysterese-Effekte der Korrekturmagnete vernachlässigen.

Ein weiteres Problem stellt die Dynamik des Beschleunigers dar. Schon durch die Lebensdauer des Teilchenstrahls ergibt sich eine Zeitabhängigkeit der Meßgrößen und damit das Erfordernis eines dynamischen Modells. Während jedoch für den Speicherbetrieb eines Ringbeschleunigers in der Regel statische Modelle noch in guter Näherung benutzt werden können, so sind sie auf den Betrieb eines Synchrotrons oder Boosters nicht mehr anwendbar.

Für alle Meßgrößen muß man hier mit Variationen in der Zeitskala der Zyklen rechnen. Auch die Hysterese-Effekte, d.h. die Nichtlinearitäten in dem Zusammenhang zwischen Strom und Feld und die Abhängigkeit dieses Zusammenhanges von der Vorgeschichte des Magneten, können aufgrund des großen Variationsbereiches der Felder starke Auswirkungen haben.

2.3 Diagnose von Beschleunigerzuständen

Die Diagnostik an Beschleunigern läßt sich in zwei Kategorien einteilen: Zum einen die Diagnose der Gerätezustände und zum anderen die Diagnose des Teilchenstrahls. Während erstere per Definition leicht gliederbar ist und ein Fehlzustand somit immer auf eine mehr oder weniger lokale Quelle zurückzuführen ist, entzieht sich der Strahlzustand häufig einer solchen Betrachtung. Besonders in zyklischen Beschleunigern wirken sich Störungen auf den Strahl meist global aus, d.h. zum Beispiel eine Ablenkung durch ein fehlerhaftes Magnetfeld an einer einzelnen Stelle führt zu einer Verschiebung der gesamten Umlaufbahn des Teilchenstrahls. Außerdem ändern sich die Parameter des Strahls nicht unabhängig voneinander, z.B. führt die Veränderung der Flugbahn in der Regel zu einer Veränderung der Arbeitspunkte (siehe unten) und der Lebensdauer des gespeicherten Teilchenstrahls.

Im folgenden Absatz werden die charakteristischen Größen erläutert, welche den Zustand des Strahls beschreiben. Anschließend wird auf die Methoden zu ihrer Messung eingegangen. Die zeitauflösende Messung dieser Größen, wie sie für einen Booster unumgänglich ist, bringt noch besondere Probleme mit sich. Diese werden am Ende des Abschnittes erläutert.

2.3.1 Charakterisierung von Teilchen in Ringbeschleunigern

Die Teilchenbewegung in Ringbeschleunigern

Betrachtet man zunächst die Bewegung eines geladenen Teilchen in einem Ringbeschleuniger. Zur Beschreibung seines Ortes bietet sich ein mitbewegtes Koordinatensystem an, in dem seine transversale Ablage relativ zur Lage eines idealen Soll-Teilchens angegeben wird (siehe Abb. 2.1), dem Orbit. In

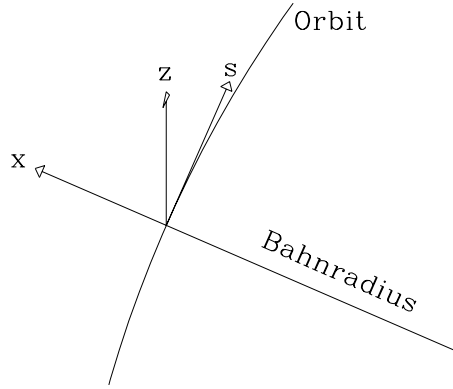


Abbildung 2.1: Ein Sollteilchen ruht im Ursprung des Orbit-Koordinatensystem. Reale Teilchen führen Schwingungen um diesen Punkt aus.

$s \hat{=}$ longitudinale, $x \hat{=}$ radiale (horizontale) und $z \hat{=}$ vertikale Abweichung von der Sollposition.

diesem System läßt sich seine Bewegungsgleichung für die beiden transversalen Ebenen $y \in \{x, z\}$ in folgender Form aufschreiben (zur Herleitung siehe z.B. [Bell85] oder [Will92])

$$y(s)'' + \left(\frac{1}{R_y^2(s)} - k_y(s) \right) \cdot y(s) = \frac{1}{R_y(s)} \cdot \frac{\Delta p}{p}. \quad (2.1)$$

Hierbei werden nur Ablenkungen durch Dipolfelder (Ablenkradius $R_y(s)$) und durch Quadrupolfelder (Fokussierungsstärke $k_y(s)$) berücksichtigt, sowie die Impulsabweichung Δp des Teilchens vom Sollimpuls p . In Kreisbeschleunigern sind die Magnetfelder für den Strahl periodisch mit dem Umfang L angeordnet, d.h. es gilt $R_y(s) = R_y(s + L)$ und $k_y(s) = k_y(s + L)$.

Diese Bewegungsgleichung läßt sich über den Ansatz

$$y(s) = \sqrt{\beta_y(s)} \cdot \sqrt{\epsilon_y} \cos(\psi_y(s) - \phi_0)$$

für Teilchen mit Sollenergie ($\Delta p = 0$) lösen, wobei $\beta_y(s)$ die Betafunktion, ϵ_y die Einzelteilchen-Emittanz und $\psi_y(s)$ die Betatronphase sind.

Anschaulich zerlegt sich die Teilchenbewegung damit in zwei Anteile. Die Betafunktion, welche vollständig durch die Magnetstruktur bestimmt ist, beschreibt den Anteil der Bewegung der periodisch zum Umfang ist. Die Cosinus-Funktion dagegen beschreibt die Schwingung des Teilchens um den Orbit. Die Amplitude dieser Schwingung ist durch die Emittanz des Teilchens gegeben, welche proportional zur Fläche der Phasenraumellipse des Teilchens

ist. Um diesen Schwingungsanteil der Teilchenbewegung zu charakterisieren, definiert man den Arbeitspunkt Q mit

$$Q \equiv \frac{1}{2\pi} \oint \frac{ds}{\beta(s)}, \quad (2.2)$$

der die Anzahl der Schwingungen pro Umlauf angibt.

Bei einem Teilchenstrahl im Gleichgewicht können die Phasen ϕ_0 statistisch verteilt und der Strahl kann in guter Näherung als transversal gausverteilt angenommen werden. Man bezeichnet $\sigma(s) = \sqrt{\epsilon_{STD}\beta(s)}$ als Strahlbreite, wobei ϵ_{STD} die Emittanz des Strahls ist. Sie ist definiert als die Emittanz der Teilchen, welche maximal eine Standardabweichung von der Strahlachse entfernt sind.

Energieabhängigkeit der Teilchendynamik

Betrachtet man nun Teilchen mit einer Abweichung Δp vom Sollimpuls p , so muss man zur Lösung der Differentialgleichung 2.1 eine partikuläre Lösung hinzuaddieren. Da die Dipole in der Regel nur horizontal ablenken, betrachten wir nur die x-s-Ebene. Transformiert man $y \rightarrow D = y \frac{\Delta p}{p}$ und beachtet nur die Teilchenbewegung in den Dipolmagneten ($k_y(s) = 0$), so ergibt sich

$$D'' + \frac{1}{R^2}D = \frac{1}{R}.$$

Die partikuläre Lösung lässt sich als Konstante ansetzen und durch Einsetzen in die Differentialgleichung bestimmen:

$$D_p = R.$$

Hieraus lässt sich die allgemeine Lösung $D(s)$ bestimmen und aus dieser die energieabhängige Bahnverschiebung $x_D(s) = D(s) \frac{\Delta p}{p}$. Die Gesamtbahn des Teilchens folgt dann zu

$$x_g(s) = x(s) + D(s) \frac{\Delta p}{p};$$

sie wird *Dispersionsbahn* genannt.

Eine weitere wichtige Größe für einen Ringbeschleuniger ist die Energieabhängigkeit der Fokussierung. Sie ergibt sich aus der Tatsache, daß Teilchen mit höherer Energie weniger stark abgelenkt und insofern weniger stark fokussiert werden. Analog zu Farbfehlern bei lichtoptischen Systemen spricht man von der Chromatizität. Sie wird definiert als Arbeitspunktverschiebung pro Energieabweichung:

$$Q' \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta p/p}. \quad (2.3)$$

Teilchenschwingungen und Instabilitäten

Der Arbeitspunkt Q nach Gleichung 2.2 gibt die Anzahl der Schwingungen pro Umlauf an und ist somit ein Indiz dafür, wann der Strahl durch Feldfehler resonant angeregt werden kann. So ist leicht einzusehen, daß bei einem ganzzahligen Arbeitspunkt ein kleiner Dipolfehler den Strahl zu einer Schwingung anregt, welche mit jedem Umlauf durch den gleichen Fehler weiter verstärkt wird. Entsprechend sind höhere Multipolfelder in der Lage, den Strahl bei $Q = n + \frac{1}{m}$ ($n, m \in \mathbb{Z}$) anzuregen. Koppelungen zwischen den Ebenen führen dazu, daß die Strahlschwingung Resonanzen bei

$$mQ_x + nQ_z = p, \quad (m, n, p \in \mathbb{Z}) \quad (2.4)$$

hat. Jedoch nimmt die Stärke der Resonanzen rasch mit ihrer Ordnung $|m| + |n|$ ab. In Abbildung 2.2 sind die Resonanzen bis zur 4. Ordnung für den nichtganzzahligen Anteil des Arbeitspunktes eingezeichnet.

Neben den transversalen Strahlschwingungen führen die Teilchen auch longitudinale Schwingungen aus, die Synchrotronschwingung. Sie wird durch die Phasenfokussierung der Hochfrequenz verursacht. Zur Erläuterung betrachten wir ein bei fester Energie E_0 gespeichertes Teilchen. Es muß bei jedem Umlauf durch die Hochfrequenz genau soviel Energie zugeführt bekommen, wie es durch Abstrahlung von Synchrotronstrahlung verliert. Dadurch hat es eine feste Phase ψ_S zur beschleunigenden Hochfrequenz. Ein Teilchen, welches mit einer erhöhten Energie $E_1 = E + \delta E$ umläuft, wird im Mittel weniger abgelenkt und bewegt sich somit auf einer weiter außenliegenden Dispersionsbahn. Das bedeutet, daß das Teilchen einen größeren Weg zurücklegt und somit die Zeit $T_1 > T_0$ für einen Umlauf benötigt.¹ Das Teil-

¹Dies gilt nur für den hochrelativistischen Fall, wenn die Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit liegt und somit nicht mehr von der Energie abhängt.

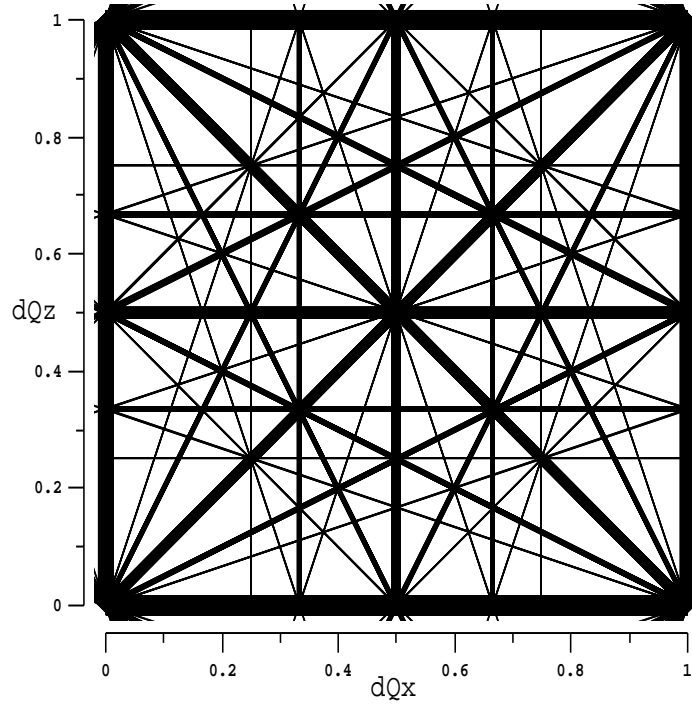


Abbildung 2.2: Ein Arbeitspunktdiagramm mit den Resonanzen bis zur 4. Ordnung. Die Dicken der Linien sind umgekehrt proportional zu den Ordnungen der Resonanzen gewählt, d.h. proportional zur Stärke der Resonanz

chen wird somit eine größere Phase zur Hochfrequenz besitzen und entsprechend weniger beschleunigt werden. Dadurch nähert es sich seiner Sollenergie, schwingt in der Regel jedoch darüber hinaus. Sobald es zu wenig Energie hat, sorgt die Phasenfokussierung umgekehrt für einen stärkeren Energiegewinn des Teilchens. Die Frequenz f_s dieser sogenannten Synchrotronschwingung hängt hierbei von der Sollphase Ψ_s , der Spannung des Cavities U_0 und der Energie des Strahls ab [Will92]:

$$f_s = f_u \sqrt{-\frac{eU_0 h \cos \Psi_s}{2\pi \beta^2 E} \left(\alpha - \frac{1}{\gamma^2} \right)} \quad (2.5)$$

Dabei ist:

$$\begin{array}{ll}
\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \frac{p_0}{\Delta p} & \text{Momentum-compaction-factor} \\
f_u & \text{Umlauffrequenz} \\
h = f_{HF}/f_u & \text{Harmonischenzahl } (h \in \mathbb{N}) \\
\beta = v_{\text{Strahl}}/c \approx 1 & \\
\gamma = \frac{E}{m_e c^2} &
\end{array}$$

Hierbei ist der *Momentum-compaction-factor* ein Maß für die Bahnlängenänderung durch eine Energieabweichung und folgt aus der Magnetstruktur. Er läßt sich leicht aus der Dispersion ableiten zu:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \oint \frac{D(s)}{R(s)} ds. \quad (2.6)$$

Die Harmonischenzahl h gibt die Anzahl der Hochfrequenzschwingungen pro Teilchenumlauf an und muß ganzzahlig sein, um die Phasenfokussierung zu gewährleisten.

Aufgrund der Chromatizität kommt es zu einer Arbeitspunktverteilung der Teilchen in Abhängigkeit ihrer Energie. Diese schränkt die Energieakzeptanz des Beschleunigers ein und verursacht zusätzlich bei negativer Chromatizität Q' die strombegrenzende *head-tail* Instabilität [Koha80].

Unter bestimmten Voraussetzungen kann es auch zu einer Koppelung der longitudinalen mit den transversalen Schwingungen kommen. So verursachen zum Beispiel höhere Moden im Cavity transversal ablenkende Felder die mit der longitudinalen Phase variieren [Suzu85b]. Aber auch bereits Dispersion im Cavity führt zu einer Koppelung, da der Energiegewinn im Cavity, der von der Phase der Synchrotronschwingung abhängt, zu einer Verschiebung des *closed-orbits* (siehe unten) führt und somit transversale Schwingungen anregen kann [Suzu85a].

2.3.2 Meßmethoden der Strahlparameter

Strahlstrom

Der mittlere Strahlstrom wird in der Regel über das Magnetfeld gemessen, welches die Teilchen in einem ferromagnetischem Ring induzieren, den sie durchfliegen. Die Bestimmung dieses Feldes erfolgt in der Regel mittels einer

Kompensationsmessung, da die Feldfreiheit des Rings mit sehr hoher Präzision gemessen werden kann [Unse91]. Diese Kompensationsmessungen können jedoch aufgrund ihrer geringen Bandbreite nur den mittleren Strahlstrom messen.

Die Ladung in einem einmalig vorbeifliegendem Elektronenpaket läßt sich auf ähnliche Weise, nach dem Prinzip der Pulstransformation messen. Für ein Elektronenpaket einer festen Form ist dann die Höhe des Spannungspulses auf einer Sekundärwicklung des ferromagnetischen Rings proportional zu der Ladung des Elektronenpaketes [Unse85]. Um eine gewisse Unabhängigkeit von der Form des Strompulses zu erhalten, wird das Signal in der Regel über einen Tiefpass verbreitert. Solange dann die Strompulslänge wesentlich kürzer als die Grenzwellenlänge des Tiefpasses ist, ist die Spannungspulshöhe unabhängig von der genauen Pulsform des Strahls.

Die Strahlstrom-Messung ist in der Regel Grundlage für die Bestimmung der Lebensdauer des Strahls. Während in statischen Speicherringen die Lebensdauer ein wesentliches Gütemaß für den Zustand des Beschleunigers darstellt, macht ihre Verwendung in Synchrotrons wenig Sinn. Die Definition der Lebensdauer geht von einem statistischen Strahlverlust aufgrund fester Störgrößen aus. Beispielsweise die Streuung an den Restteilchen des Vakuums (Vakuum-Lebensdauer) oder Thomson-Streuung der Elektronen in einem Bunch untereinander (Touschek-Lebensdauer) sind Ursachen für solche Verluste. In einem Synchrotron werden diese Lebensdauern jedoch fast immer vernachlässigbar groß gegen die Verweildauer des Strahls in der Maschine zwischen Injektion und Ejektion sein. Hier werden Strahlverluste eher durch die ungewollte Variation von Maschinen-Parametern ausgelöst, wie z.B. eine Störung auf der Stromkurve eines Quadrupols, die den Arbeitspunkt auf eine Resonanz schiebt. Um die Störung ausfindig zu machen, ist es wichtig den Zeitraum zu ermitteln in dem der Strahlstrom abnimmt.

Strahllage

Bei der Strahllagemessung muß man zwei Arten der Messung unterscheiden: die *closed-orbit* Messung, welche das zeitliche Mittel des Strahllage mißt und die *single-turn* Messung, welche die Position des Strahlschwerpunktes beim einmaligen Passieren mißt. Letztere wird vor allem für die Messung des ersten Umlaufs benötigt, solange der Strahl noch nicht gespeichert ist (*first-turn* Messung).

Bei einem Strahl im Gleichgewicht liefern beide Messungen dieselben Ergebnisse. Wird der Strahl angeregt, so kann die *single-turn* Messung die Schwingung auflösen, während der *closed-orbit* sich nicht verändert. Jedoch ist für diese Art der Messung eine aufwendige Verarbeitungselektronik nötig und die Daten lassen sich nur mit einer sehr schnellen Digitalisierung aufnehmen. Auf diese Weise können *single-turn* Messungen jedoch weit mehr Informationen über den Strahl liefern als seine Lage, z.B. seinen Arbeitspunkt, seine Dämpfungszeiten und sogar Rückschlüsse auf die Optik des Beschleunigers sind möglich (siehe z.B. [Diet96]).

Für die Strahllagemessung koppelt man an das elektromagnetische Feld des Teilchenstrahls an. Dazu lassen sich kapazitive *Pickups* verwenden, kleine von der Strahlkammer isolierte Leiter. Das elektromagnetische Feld der Strahls induziert auf diesen Leitern eine Ladung, welche abhängig von der Strahllage, dem Strahlstrom und der Monitor-Geometrie ist. Durch die Übertragungsfunktion der *Pickups* ergibt sich zusätzlich eine Abhängigkeit vom Strahlspektrum, d.h. der Füllstruktur und der Länge des Strahlbunches. Durch die Normierung der Signale mit dem Summensignal lassen sich die Abhängigkeiten vom Strahlstrom und dem Strahlspektrum kompensieren. Aus drei solcher Signale läßt sich im Prinzip bei gegebener Geometrie die horizontale und vertikale Ablage berechnen. Bei vier, symmetrisch um den Strahl verteilten *Pickups* vereinfacht sich die Positionsberechnung für Ablagen nahe dem Mittelpunkt zu:

$$x = a_x \frac{s_1 + s_2 - s_3 - s_4}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \quad \text{und} \quad z = a_z \frac{s_1 + s_3 - s_2 - s_4}{s_1 + s_2 + s_3 + s_4} \quad (2.7)$$

Die Geometriefaktoren a_x und a_z sind durch Kalibration zu bestimmen. Für größere Ablagen werden die Zuordnungsfunktionen in der Regel nichtlinear und sind nicht für beliebige Geometrien analytisch bestimmbar. Für die Geometrie der DELTA-Strahllagemonitore ist das Isosignallinienfeld in Abb. 2.3 gezeigt [Jank94]. Nach der Formel 2.7 würde sich ein rechteckiges Gitter ergeben. Man sieht, daß für Ablagen größer als fünf Millimeter die Formel 2.7 nur noch eine qualitative Bewertung der Strahllage zuläßt.

Da das elektromagnetische Spektrum des Strahls aus Harmonischen der Umlauffrequenz besteht, können die Signale s_1 bis s_4 im Prinzip bei fast beliebigen Frequenzen gemessen werden. Bei kapazitiven *Pickups* bietet es sich jedoch an, eine einzelne, möglichst hohe Frequenz zu wählen, welche noch im

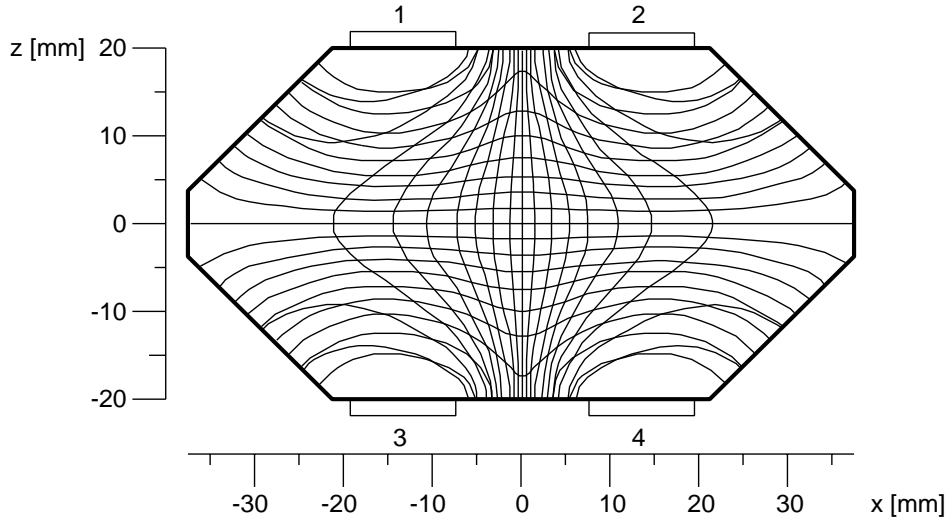


Abbildung 2.3: Die Isosignallinien für die vier Pickups der DELTA-Strahllagemonitore. In der Nähe des Mittelpunktes ergibt sich ein nahezu rechteckiges Gitter, was durch eine einfache Formel die Umrechnung der Feldstärken in Ablagen ermöglicht.

Strahlspektrum enthalten ist. Außerdem kann durch eine sehr schmalbandige Messung der Signal-Rauschabstand verbessert werden. Zumeist wählt man die beschleunigende Hochfrequenz selbst, oder eine benachbarte Harmonische. Für eine präzise Messung ist erforderlich, daß das Verstärkungsverhalten aller vier Kanäle identisch ist, da schon geringe Unterschiede bei der Signal-Differenzbildung zu großen Fehlern führen können.

Über dieses Verfahren läßt sich der Orbit an einem Punkt s_0 messen. Um den gesamten Orbit abschätzen zu können sollte man zumindest so viele Monitore haben, daß die Betatronschwingung des Strahls um den idealen Orbit beobachtet werden kann. Das heißt der geplante Arbeitspunkt bestimmt die Anzahl der benötigten Strahllagemonitore N nach

$$N > 4 \cdot \max(Q_x, Q_z).$$

Arbeitspunkte

Der Arbeitspunkt ist von großer Bedeutung bei der Beschreibung des Zustandes eines Beschleunigers. Ein falscher Arbeitspunkt hat Auswirkungen

auf die Lebensdauer eines gespeicherten Strahl ebenso wie auf die Injektion und Ejektion.

Die Arbeitspunktmessung beruht immer auf der Messung eines Signals, welches mit der Strahlschwingung moduliert ist. Geeignet ist zum Beispiel ein Signal, wie es zur Orbitmessung verwendet wird. So enthält jedes der Signale s_1 bis s_4 eine Modulation durch beide Schwingungsebenen. Will man eine Schwingungsebene unterdrücken, so kann man über passive Hybrid-Addierer und Subtrahierer die Signale $s_x = s_1 + s_2 - s_3 - s_4$ bzw. $s_z = s_1 + s_3 - s_2 - s_4$ bilden, welche jeweils im wesentlichen nur noch mit einer Schwingungsebene moduliert sind [Dunk96]. Hierbei ist jedoch anzumerken, daß die Messung an einem einzelnen Ort im Ring prinzipiell nicht den Arbeitspunkt bestimmen kann, sondern nur seinen Abstand zur nächsten ganzen Zahl $\delta Q = |Q - n|$ mit $n \in \mathbb{N}$ so daß $\delta Q < 0.5$. Wieviel Schwingungen n der Strahl in einem Umlauf gemacht hat ist so nicht mehr feststellbar, lediglich die Phasenverschiebung am Ort des Monitors $\Delta\phi = \delta Q \cdot 2\pi$ ist meßbar.

Um eine Strahlschwingung detektieren zu können, muß der Strahl zuerst angeregt werden. Die Einzelteilchen vollführen zwar immer Schwingungen, jedoch kann nur die Schwingung des Strahlschwerpunktes erfaßt werden.² Diese klingt aber entweder aufgrund der Dämpfung schnell aus, oder aufgrund der mangelnden Kohärenz der einzelnen Teilchenschwingungen – das Phänomen ist unter dem Namen *Landau-Dämpfung* bekannt. Deshalb muß die Anregung permanent erfolgen, oder in kurzen Intervallen synchron zur Messung. Zur Anregung wird ein Magnet benötigt, der in der Lage ist die hohen Anregungsfrequenzen $\delta f_\beta = \delta Q \cdot f_u$ – typischerweise für Ringe mit einem Umfang von einigen hundert Meter etwa 0,1-1 MHz – auf den Strahl zu übertragen. Alternativ lassen sich auch elektrische Felder für die Anregung verwenden. Bei hochrelativistischen Teilchen werden dann jedoch hohe Feldstärken nötig. Da die Strahlschwingung eine hohe Güte besitzt, und nur die resonante Antwort des Strahls zu messen ist, kommt man sonst mit einer geringen Anregungskraft aus.

Für eine einmalige Messung kann der Strahl mit einem Puls angeregt werden. Dabei muß die Pulslänge unterhalb der Wellenlänge $\lambda_{\max} = c/\delta f_\beta$

²Eine Ausnahme bildet dabei die Messung über Schottky-Rauschen. Dieses passive Verfahren zur Arbeitspunktmessung ist anwendbar bei Protonen und Ionen Beschleunigern. Voraussetzung sind nahezu ungedämpfte Teilchen damit die Amplituden der Einzelteilchenschwingungen auch ohne aktive Anregung hinreichend groß sind (siehe z.B. [Scha91])

liegen, damit die Resonanzfrequenz im Spektrum des Pulses liegt. Alternativ kann man den Strahl auch mit weißem Rauschen anregen, welches alle infragekommenden Anregungsfrequenzen enthält (siehe z.B. [Schm96]).

Eine dritte Möglichkeit ist die sinusförmige Anregung, wobei der mögliche Frequenzbereich meist mit einem sogenannten Wobbelgenerator zyklisch überstrichen wird. Gegenüber den ersten beiden Methoden hat diese den Vorteil, mit kleineren Anregungsleistungen auszukommen. Alternativ kann man die Frequenz auch aus dem gemessenen Signal bestimmen und über einen *Phase-lock-loop* Verstärker auf die Anregung zurückgeben. In diesem Fall ist es wichtig die Anregungsleistung über die Strahlschwingungsamplitude zu regeln, da durch die permanente resonante Anregung der Strahl sonst zu große Schwingungsamplituden erreichen kann.

Auch für die Auswertung der Signale gibt es mehrere Möglichkeiten. Die über einen Pickup-Monitor gelieferten Signale sind, wie bereits erwähnt, mit der Betatronfrequenz amplitudenmoduliert. Der direkte Weg zur Signalaufbereitung ist somit die Demodulation der Differenzsignale s_x und s_z (z.B. [Hein79]) und die anschließende Frequenzmessung. Eine andere Möglichkeit besteht darin, sich mit einem Spektrumanalysator das Pickup-Spektrum direkt zu betrachten. Der Abstand zwischen der Harmonischen und den Seitenbändern liefert in diesem Fall die Frequenz $\delta f_\beta = \delta Q \cdot f_u$. Schließlich kann man, wie bereits bei der Orbitmessung erwähnt, die Orbitdaten von Umlauf zu Umlauf aufnehmen, digitalisieren und mit einer Fouriertransformation auswerten. Spezielle *Digital-signal-processing* Systeme stellen meist eine *Fast-fourier-transformation* zur Berechnung des Frequenzspektrums der Eingangssignale zur Verfügung. Ebenso wie beim Spektrumanalysator geben die Stellen der lokalen Maxima den horizontalen und vertikalen Arbeitspunkt an.

Magnet-Optik

Die Variation der Strahlform über den Umlauf läßt sich mit Hilfe der Betafunktion ausdrücken. Eine direkte Strahlformmessung ist jedoch mit größerem Aufwand verbunden, weshalb man in der Regel auf eine große Zahl dieser Monitore zur Bestimmung der Betafunktion verzichtet und einen indirekten Weg der Messung wählt.

Mit Hilfe der Matrixoptik für Ringbeschleuniger läßt sich leicht zeigen, daß ein kleiner Quadrupolfehler Δk eines Magneten der Länge l an der Stelle s_0 zu einer Arbeitspunktverschiebung

$$\Delta Q = \frac{1}{4\pi} \int_{s_0 - \frac{l}{2}}^{s_0 + \frac{l}{2}} \Delta k \beta(s) ds$$

führt. Das heißt, das sich der Arbeitspunkt proportional zur Betafunktion verschiebt. Geht man über zur mittleren Betafunktion $\bar{\beta}(s_0)$ über die Länge des Quadrupols, so kann man die Gleichung auflösen nach:

$$\bar{\beta}(s_0) = \frac{4\pi}{l} \frac{\Delta Q}{\Delta k}. \quad (2.8)$$

Verändert man also die Stärke eines Quadrupols um Δk und mißt die Verschiebung des Arbeitspunktes ΔQ so folgt daraus der Wert der lokalen Betafunktion im Quadrupol. Somit läßt sich die Messung der Optik auf die Messung des Arbeitspunktes zurückführen.

Alternativ kann man auch über die Messung von Orbitverschiebungen durch zusätzliche Dipolfelder die Optik vermessen. Es läßt sich zeigen, daß für die Orbitverschiebung Δy am Ort s_k des Winkel-Kicks θ_k gilt:

$$\Delta y = \frac{1}{2} \beta(s_k) \theta_k \cot(\pi Q).$$

Eine genauere Methode ist die Messung der *Beam-response-matrix* $R_{i,j}$, erstmals vorgestellt von Chung et al. 1993 [Chun93]. Sie ist definiert als

$$\begin{pmatrix} \Delta y_1 \\ \vdots \\ \Delta y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_m \end{pmatrix}$$

Die Messung beruht auf der aufeinander folgenden Erzeugung von m Winkel-Kicks θ_j durch Korrekturdipole (*Steerer*) bei gleichzeitiger Messung der Orbitverschiebung Δy_i an n Strahllagemonitoren im Ring. Mittels eines numerischen Verfahrens können aus der Messung die Betafunktionen bestimmt werden. Das geschieht, indem die beobachteten mit simulierten Orbitverschiebungen verglichen werden und man die Parameter (Quadrupolstärken, Steererstärken, Fehler der absoluten Positionen etc.) in der Simulation solange variiert, bis die Simulation mit der Messung übereinstimmt [Kusk98]. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt vor allem in der Redundanz der Messung, die es erlaubt, in der Simulation sehr viele Parameter gleichzeitig anzupassen.

Chromatizität

Die Chromatizität läßt sich nach den Definitionen 2.3 und 2.6 ausdrücken als:

$$Q' = \alpha \frac{\Delta Q}{\Delta L/L}$$

Die Weglänge des Orbits läßt sich wiederum in gewissen Grenzen aufgrund der Phasenfokussierung über die beschleunigende Hochfrequenz einstellen. Da $L = h \cdot c/f_{HF}$ ist, gilt bei kleinen Änderungen der Frequenz:

$$\begin{aligned} Q' &= \alpha \frac{\Delta Q}{-\Delta f_{HF}/f_{HF}} \\ &= -\alpha h \frac{\Delta f_{\beta}}{\Delta f_{HF}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Der *Momentum-compactness-factor* α läßt sich aus der Bestimmung der Dispersion und der Betafunktionen ableiten, stimmt aber in der Regel auch sehr gut mit dem Wert aus der theoretischen Optik überein, da sich lokale Feldfehler auf diese integrale Größe kaum auswirken. Somit läßt sich die Chromatizität Q' aus der Verschiebung des Arbeitspunktes durch Veränderung der Frequenz bestimmen.

2.3.3 Messung dynamischer Größen

Während Speicherringe in der Regel statisch bei einer Energie und somit bei konstanten Magnetfeldern betrieben werden, muß man bei einem Synchrotron und seinen dynamischen Sollwertkurven immer mit schnellen Änderungen aller optischen Parameter rechnen. Dieser Umstand ist bei Verfahren zur Messung dieser Parameter zu berücksichtigen. Der Dortmunder Booster – mit dem wir uns eingehender im nächsten Kapitel befassen werden – kann neben seiner zyklischen Rampe zur Beschleunigung der Elektronen auf hohe Energien auch statisch betrieben werden. So ist es prinzipiell möglich, die optischen Parameter mittels statischer Verfahren zu bestimmen (z.B. [Kamp96]). Damit lassen sich jedoch nur wenige Folgerungen für den zyklischen Betrieb ableiten, da das Verhalten aller Komponenten eines Boosters wesentlich von der Dynamik abhängt, sei es über die Regelgeschwindigkeit der Netzgeräte, die Hysterese der Magnete oder Phasenverschiebungen bei der Variation der Hochfrequenzleistung.

Die Messung einer zeitlich veränderlichen Größe verlangt entweder ein Verfahren, welches den Meßwert in einem Zeitraum bestimmt in dem die Größe als „quasi-statisch“ angesehen werden kann, oder ein Verfahren, welches die Variation des Meßwertes während der Messung berücksichtigt. Z.B. kann eine lineare Änderung des Meßwertes $x(t)$ während der Messung leicht im Ergebnis \bar{x} berücksichtigt werden:

$$\bar{x}(t_0 \rightarrow t_1) \approx x\left(\frac{t_0 + t_1}{2}\right).$$

Schnelle Messungen stellen in der Regel höhere Anforderungen an die verwendeten Meßaufbauten, da der Einfluß von Signalrauschen sich nicht durch Mittelung reduzieren läßt. Da Messungen mit Meßraten ab ca. 2 Hz automatisiert durchgeführt werden müssen, sollte dabei auch die nachträgliche Bewertbarkeit der Messung gesichert werden. So liefert z.B. die Formel 2.7 auch Ablagen x und z , wenn die Signale $s_1 \cdots s_4$ bereits so klein sind, daß sie durch Rauschen dominiert werden. Wird zusätzlich zu den x und z Ablagen das Summensignal $\Sigma s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4$ aufgenommen, so kann man auch nachträglich Aussagen über die Verlässlichkeit der Orbitdaten machen.

Bei zyklischen Systemen lassen sich die Messungen durch Mittelung verbessern, vorausgesetzt, daß sich die Meßwerte einem bestimmten Zeitpunkt im Zyklus zuordnen lassen. Es ist auch hilfreich, die verschiedenen Zyklen miteinander vergleichen zu können, um stark abweichende Meßwerte auf eine gemeinsame Quelle zurückführen, z.B. die Orbitablagen eines Zyklus mit sehr geringem Strahlstrom.

2.4 Effiziente Steuerung von Beschleunigeranlagen

Im Folgenden werden Gütemaße dargestellt, die ermöglichen die unterschiedlichen Aufgaben einer Beschleunigeranlage zu beurteilen. Für die Beurteilung der Steuerungseffizienz werden die unterschiedlichen Aufgaben und Nutzer-Typen differenziert und die Korrelation, welche Steuerungsaufgaben von welchem Typ von Nutzer bearbeitet werden.

2.4.1 Gütemaße der Effizienz eines Beschleunigers

Bei der Definition eines Gütemaßes muß man immer den Zweck der Anlage betrachten, d.h. das Produkt, welches die Anlage produzieren soll. Die zwei

häufigsten Anwendungen für Teilchenbeschleuniger sind die Teilchenphysik und die Erzeugung von Synchrotronstrahlung.

In der Teilchenphysik ist die Luminosität das häufigst benutzte Qualitätsmaß. Sie ist definiert als

$$L = \frac{1}{4\pi e^2 f_u n} \cdot \frac{I_1 I_2}{\sigma_x^* \sigma_z^*}$$

wobei n die Anzahl äquidistanter Bunche, I_1, I_2 die Ströme der kollidierenden Strahlen und $(\sigma_x^* \sigma_z^*)$ die Querschnittsfläche im Wechselwirkungspunkt ist [Will92]. Sie ist ein Maß für die summierte Wechselwirkungsrate der kollidierenden Teilchenstrahlen.

Bei der Erzeugung von Synchrotronstrahlung sind verschiedene Qualitätsmaße gebräuchlich, die in unterschiedlichem Umfang neben dem eigentlichen Beschleuniger auch die speziellen Magnete zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung – die sogenannten *Insertion-devices* – mit einbeziehen. Letztlich entscheidend ist meist die Anzahl Photonen N_P im gewünschten Spektralbereich, meist 1^0_{00} Bandbreite (BW), welche auf die Probe auftreffen. Sie kann über die Brillianz B abgeschätzt werden, welche definiert ist als

$$B = \frac{N_P}{1s \cdot 1^0_{00} BW \cdot 1mm^2 \cdot 1mrad^2 \cdot 1A}.$$

Sie ist normiert auf eine Quellpunkt-Emittanz von $1mm \cdot mrad$ und ein Amperere Strahlstrom.

Es gibt auch Gütemaße eines Teilchenbeschleunigers, die für beide Anwendungen gelten. So ist das Verhältnis Strahlzeit zur Gesamtbetriebszeit eine sehr wichtige Größe. Hier fließt auf der einen Seite die Lebensdauer des Teilchenstrahls ein, auf der anderen Seite Wartungszeiten der Anlage, sowie Anlauf und Akkumulationszeiten.

Für jeden Einfluß kann man die Gütemaße weiter zergliedern in Unterfunktionen. So läßt sich z.B. die Lebensdauer darstellen durch

$$\frac{1}{\tau_G} = \frac{1}{\tau_{\text{Touschek}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Vakuum}}} + \dots$$

Die Existenz unterschiedlicher, abhängiger Gütemaße hat auch Einfluß auf die Optimierung eines Beschleunigers. So kann die Verbesserung der

Emittanz zu einer Verschlechterung der Lebensdauer führen. Ein Gütemaß muß insofern immer auf seine Relevanz für die aktuellen Anforderungen an die Maschine geprüft werden.

Die genannten Gütemaße sind in der Regel von sehr unterschiedlichen Faktoren abhängig. So ist die Emittanz eines Speicherrings in erster Linie vom Design der Magnetstruktur und der verwendeten Optik abhängig, während die Wartungszeiten sehr von organisatorischen und finanziellen Randbedingungen abhängen. Für die weiteren Betrachtungen sollen die Einflüsse der Anlagensteuerung auf einige wichtige Gütemaße einer Synchrotronstrahlungsquelle betrachtet werden.

Emittanz des Strahls

Die Anlagensteuerung soll natürlich nicht den Designwert der Emittanz des Beschleunigers ändern. Gerade in der Inbetriebnahmephase eines Beschleunigers können jedoch verschiedene Einflüsse, wie z.B. eine zu große Koppelung zwischen den Strahlschwingungsebenen, Strahlvibrationen oder Magnetfehler, zu einer Vergrößerung der effektiven Emittanz führen. Um diese Fehler aufspüren und beseitigen zu können, ist ein automatisiertes Verfahren zur Emittanzmessung hilfreich, da es ermöglicht den Einfluß einer einzelnen Maßnahme auf die effektive Emittanz schnell zu bestimmen.

Lebensdauer des Strahls

Eine automatisierte und präzise Messung der Strahllebensdauer ist sowohl in der Inbetriebnahme- als auch in der Produktionsphase eines Beschleunigers unverzichtbares Werkzeug zur Verbesserung der Anlageneffizienz. Diese vitale Größe bei fast jeglicher Anwendung des Beschleunigers wird in der Inbetriebnahmephase durch verschiedenste Effekte beeinflusst. Konstruktionsfehler einzelner Magnete, Streufelder, Orbitfehler, Vakuumeffekte, Abweichung einzelner Netzgeräte von ihren Toleranzen und verschiedenste Strahlinstabilitäten können die Lebensdauer des gespeicherten Strahls reduzieren. Aber auch in der Betriebsphase kann die Lebensdauer durch unterschiedliche Effekte beeinflusst werden.

Akkumulationszeit

Bei Speicherringen mit *full-energy* Linacs oder Synchrotrons ist die Akkumulationszeit häufig so kurz, das eine weitere Optimierung nur noch unbedeutend zur Effizienzsteigerung der Gesamtanlage beiträgt. Das hat seine Ursache in der sehr geringen Zykluszeit T_Z zwischen den Injektionen, die linear in die Akkumulationszeit eingeht. Bei Boostern mit Zykluszeiten $> 1s$ hat eine Optimierung jedoch großen Einfluß auf das Verhältnis Strahlzeit zur Gesamtbetriebszeit und ist insofern wichtig für die Anlageneffizienz. Für große Lebensdauern³ des Teilchenstrahls gilt:

$$T_A = \frac{I_{Sr} T_Z T_{Sr}}{G_A Q_Q} \quad (2.10)$$

Die Akkumulationszeit T_A hängt, neben dem zu erreichenden Strom I_{Sr} und der Umlaufzeit T_{Sr} im Speicherring, nach Gleichung 2.10 von drei Faktoren ab:

- Die Zeit zwischen zwei Injektionen T_Z wird, wie oben erwähnt, durch die Zykluszeit des Hauptbeschleunigers bestimmt.
- Die Akkumulationseffizienz G_A setzt sich zusammen aus den Transmissionen der Vorbeschleuniger und denen der Transfers zwischen den Beschleunigern.
- Die Ladungsmenge aus der Teilchenquelle Q_Q die gegebenenfalls durch die Betriebsart des Beschleunigers bestimmt wird.

³Für Akkumulationszeiten in der Größenordnung der Strahllebensdauer τ ergibt sich ein maximal erreichbarer Strom I_{\max} von

$$I_{\max} = \frac{G_A Q_Q}{T_{Sr}(1 - \exp(-T_Z/\tau))}.$$

Dieser Strom wird nur asymptotisch erreicht, die Akkumulationszeit beträgt für Strahlströme $I_{Sr} < I_{\max}$

$$T_A = \tau \cdot \left(-\ln \left(1 - \frac{I_{Sr} T_Z T_{Sr}}{\tau G_A Q_Q} \right) \right).$$

2.4.2 Steuerungseffizienz bei Beschleunigeranlagen

Für den Betrieb des Beschleunigers kann man die Steuerungsaufgaben in drei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe von Aufgaben dient dem Service. Dazu zählt u.a. die Wartung der Maschine, das Ein- und Ausschalten, die Behandlung von Gerätefehlern und die Akkumulation von Strahlstrom. Die Experimente an dem Beschleuniger stellen die zweite Gruppe dar. Als dritte Gruppe kann man den Beschleunigerbetrieb bezeichnen, der sich mit der Fortentwicklung der Maschine beschäftigt, d.h. die Inbetriebnahmephase und ihre Fortsetzung in der Produktionsphase zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der Maschine.

Der Beschleunigerbetrieb läßt sich dabei am deutlichsten einem Nutzertyp zuordnen. Denn von der Beschleunigerphysik kann in diesen Schichten ein fundiertes Wissen des Operators der Maschine vorausgesetzt werden. D.h. der Operator kennt die notwendigen Abläufe die er durchführen will, bedarf nur der Anleitung über die Details und bestmöglicher Automatisierung der Meßvorgänge zur Zeitersparnis.

Im Experimentebetrieb hängt die Anforderung an die Steuerung davon ab, ob grundsätzlich für die Steuerung der Maschine feste Operateure eingesetzt werden, oder ob die Experimentatoren die Maschine selbst betreiben. Im ersteren Fall muß jeder Operator nur einmal angelernt werden, im letzteren Fall muß mit häufigen Wechseln und insofern mit Bedienung durch Anfänger gerechnet werden. Die Steuerung sollte in letzterem Fall eine komplette Führung anbieten, d.h. alle Funktionen, die dem Operator zur Verfügung stehen, sollten übersichtlich in einer Benutzeroberfläche zusammengefaßt werden, welche zahlreiche Hilfen für den Operator zur Verfügung stellt.

Für den Servicebetrieb gilt gleiches wie für den Experimentebetrieb, zusätzlich sollten aber auch die Bedürfnisse des Experten berücksichtigt werden, da die Aufgaben des Servicebetriebs auch für den Beschleunigerbetrieb benötigt werden. Das kann zum Beispiel über sogenannte „*Shortcuts*“ in menügesteuerten graphischen Benutzeroberflächen geschehen, die ermöglichen, alle Funktionen auch über Tastenkombinationen abzurufen, um den Auswahlprozeß zu beschleunigen.

Kapitel 3

Die Dortmunder Elektronen-Testspeicherringanlage DELTA

Wie im vorigen Kapitel ausgeführt wurde, gibt eine Beschleunigeranlage vielfache Ansatzpunkte für eine Untersuchung der Effizienz. Um das Dargelegte zu konkretisieren, wird im zweiten Teil dieser Arbeit die Anwendung der ausgearbeiteten Betrachtungen auf die Beschleunigeranlage DELTA erfolgen. Im Speziellen soll ein Konzept für die Zustandsdiagnostik des Booster-Synchrotrons Bodo entwickelt werden. Für dieses Konzept werden im Folgenden die verschiedenen Aufgaben des Booster-Synchrotron im Kontext von DELTA dargelegt, um die Anforderungen herleiten zu können, die durch sie für die Anlagensteuerung und Diagnostik folgen.

3.1 Zielsetzung und Aufbau von DELTA

Die Dortmunder Elektronen-Testspeicherringanlage DELTA ist speziell konzipiert, Grundlagenforschung an einem Speicherring als Synchrotronstrahlungsquelle zu ermöglichen. Sie dient zum einen als hochbrillante Synchrotronstrahlungsquelle für Anwender aus der Region, zum anderen als Forschungsanlage für die Weiterentwicklung von Beschleunigern und Synchrotronstrahlungsquellen.

Die Beschleunigeranlage besteht aus einem Linearbeschleuniger, dem Synchrotron Bodo (Booster Dortmund) und dem Speicherring Delta (siehe Abb. 3.1).

Die in einer Triodengun erzeugten Elektronen werden von dem Linearbeschleuniger vorbeschleunigt. Über den Transferkanal T1 werden die Elektronen in den Booster geleitet. Das Booster-Synchrotron Bodo beschleunigt die Elektronen in einigen Sekunden auf die Endenergie von maximal 1500 MeV. Der Transferkanal T2 leitet die Teilchen dann in den Speicherring Delta. Alternativ kann der Strahl auch in Bodo bei beliebiger Energie zwischen Injektion und Ejektion gespeichert werden.

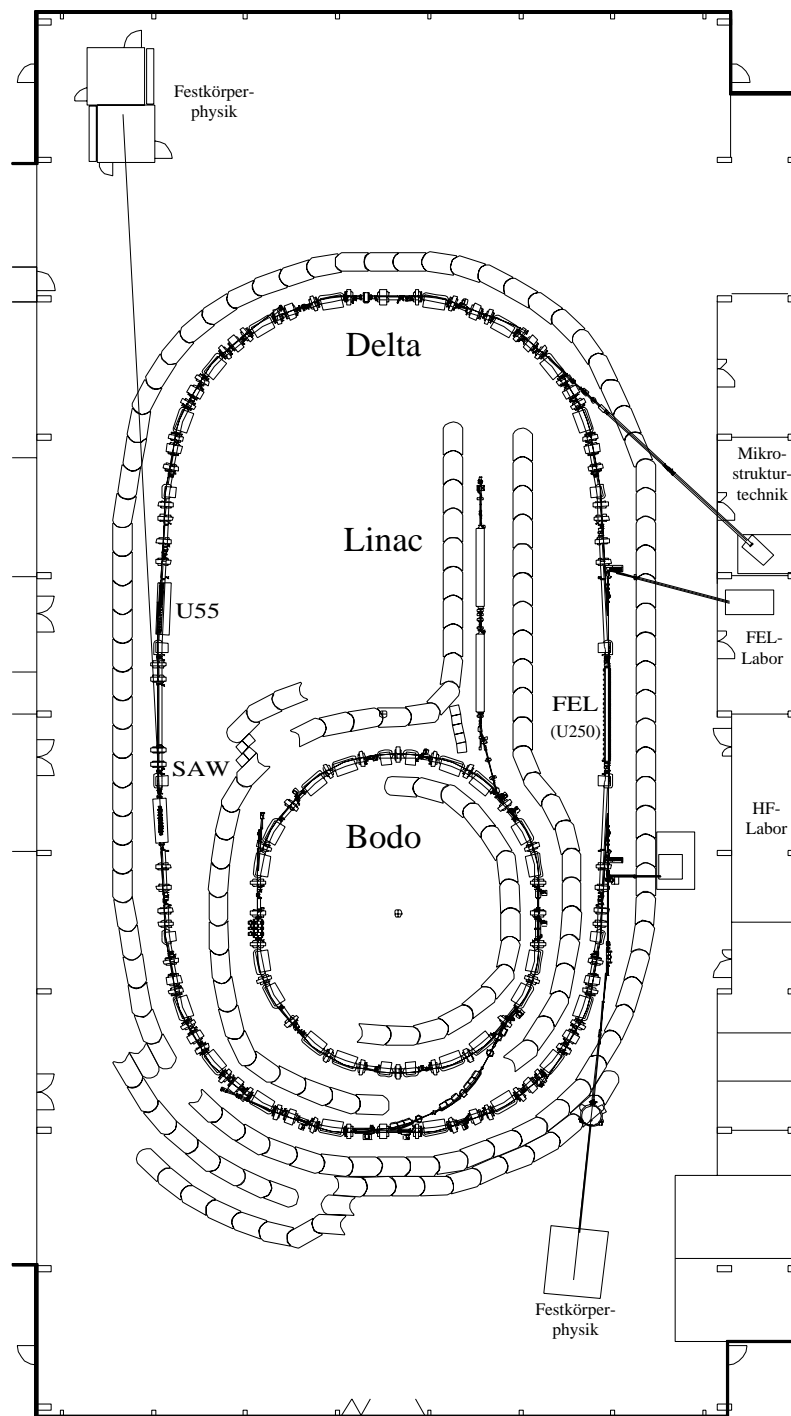


Abbildung 3.1: Die Dortmunder Elektronen-Testspeicherringanlage DELTA.

3.2 Der Linearbeschleuniger

Der Linearbeschleuniger beschleunigt Elektronen aus einer Triodengun von 50 keV auf ca. 75 MeV. Er besteht im wesentlichen aus drei 3 GHz Beschleunigungsstrukturen, die von zwei Sendern mit je 25 MW Pulsleistung für 4 μ s mit Hochfrequenzleistung gefüllt werden.

Die Triodengun kann mit zwei verschiedenen Typen von Pulsen betrieben werden. Der eine erzeugt 2 ns Pulse für einen *Single-bunch* Modus des Speicherrings, in welchem man die höchsten Peakströme erreichen kann; der andere kann Pulse von 90 ns Länge erzeugen, welche für die schnelle Füllung des Speicherrings mit hohen mittleren Strömen genutzt werden.

3.3 Der Akkumulationsprozeß an DELTA

3.3.1 Injektion in den Booster

Die aus dem Linac kommenden Elektronen werden über den Transferkanal T1 in den Booster injiziert. Der Transferkanal hat 2 horizontal ablenkende Hauptdipol-, je zwei horizontale und vertikale Korrekturdipol- und 4 Quadrupol Magnete zur Strahlführung. Für die Injektion werden vier gepulste Magnete verwendet. Drei Luftspulen im Booster, sogenannte Kicker, die den Strahl nur für einen Booster-Umlauf ablenken und ein Septum welches den injizierten Strahl möglichst parallel zu seiner Umlaufbahn einlenkt, ohne den gespeicherten Strahl zu beeinflussen. Dafür trennt ein Wirbelstromschild den Transferkanal vom Booster im Septum, welches das Magnetfeld des Septums zum Booster hin abschirmt. Die Kicker können in unterschiedlichen Modi betrieben werden. Zur Zeit werden sie als Sinushalbwellen-Pulser mit 350 ns Pulsbreite betrieben; zusätzlich ist jedoch auch ein Rechteckpuls-Mode vorgesehen, der über einen Strahlumlauf, d.h. 168 ns, das Feld aufbaut, es für fünf Umläufe hält und in einem Umlauf wieder abbaut. Dieser Modus soll für die Untersuchung von transversalem Phasenraumstacking bei niedrigen Energien genutzt werden. Die Injektionselemente werden dabei durch ein programmierbares Timing [Lüde94] synchron zu der Hochfrequenzleistung gepulst.

3.3.2 Teilchentransfer vom Booster zum Speicherring

Die Ejektion aus dem Booster erfolgt mit einem einzelnen Kicker. Um die Stärke dieses Kickers auf ein technisch realisierbares Maß reduzieren zu können, wird der Strahl kurz vor der Ejektion durch die synchrone Erzeugung von Ablenkkfeldern über drei Dipolmagnete (einer lokalen Dreierbeule) an die Schiene des Ejektionsseptums herangeschoben. Ein Septum lenkt den Strahl in den Transferkanal T2, durch den die Elektronen in den Speicherring Delta geleitet werden. In Delta sorgen wiederum ein Septum und drei Kicker für die Injektion. Die Dipolnetzgeräte für den Transferkanal T2 werden synchron zur Ejektion über einen 50 ms Vollwellenpulser betrieben. Durch die Pulsung konnte auf eine Kühlung der Dipole verzichtet werden, was wiederum eine erheblich kompaktere Bauweise des Transferkanals ermöglicht.

Die Akkumulation der Elektronen in Delta erfolgt über eine Injektion parallel zum gespeicherten Strahl. Aufgrund der Inkohärenz der Einzelteilchenschwingungen um den Sollorbit (siehe *Landau-Dämpfung* [Here87]) verteilt sich der injizierte Strahl im transversalen Phasenraumvolumen um den gespeicherten und zieht sich dann aufgrund der Dämpfung in Delta näherungsweise auf seine natürliche Strahlbreite zusammen. Diese resultiert aus der gleichzeitigen Anregung und Dämpfung durch Abstrahlung von Synchrotronquanten und hängt nur von der eingestellten Optik und der Energie ab.

3.4 Das Booster-Synchrotron Bodo

3.4.1 Aufgaben des Boosters

Bodo ist primär als Hauptbeschleuniger für den Speicherring Delta konzipiert. Im Rahmen von DELTA sind aber auch weitere Anwendungen vorgesehen. So soll der Booster als Forschungsobjekt für die Entwicklung kompakter Synchrotronstrahlungsquellen dienen. Außerdem sind Anwendungen als Teilchenquelle für die Detektorphysik und als Hauptbeschleuniger für einen Speicherring zur Röntgentiefenlithographie mittels Synchrotronstrahlung (*LiDo* [Kirc89]) angedacht.

3.4.2 Designdaten von Bodo

Klassische Synchrotrons werden mit einer sogenannten *White*-Schaltung aufgebaut, welche die Energie der Magnete in einem Schwingkreis speichert und somit einer festen Stromkurve folgt [Both90]. Typischerweise liegt die Frequenz der Zyklen dieser Synchrotrons zwischen 10 und 50 Hz. Die Ejektionsenergie kann dann nur über den Zeitpunkt der Ejektion gewählt werden. Um den verschiedenen Anforderungen an Bodo gerecht zu werden, wurde statt eines Synchrotrons mit *White*-Schaltung ein „rampbarer Speicherring“ aufgebaut. Dipol- und Quadrupolnetzgeräte können bei diesem entlang frei wählbarer Kurven verfahren werden. Die höhere Flexibilität erkaufte man sich dabei jedoch mit einer wesentlich geringeren Zyklusfrequenz. In seiner ersten Ausbaustufe ist Bodo dafür ausgelegt, in einem fünf Sekunden Zyklus von der Injektionsenergie bei knapp 100 MeV bis zu einer Energie von 1500 MeV zu beschleunigen. Eine Aufrüstung der Netzgeräte soll später Zyklen von 1 s bis zur maximal Energie ermöglichen [Delt90].

Aufgrund der engen räumlichen Verhältnisse mußte für Bodo eine sehr kompakte Bauweise gewählt werden. So beträgt der Umfang von Bodo nur 50,4 m, während Delta bei gleichem Ablenkradius 115 m Umfang hat. Das hat zur Folge, daß der mögliche Platz für Diagnostik und Korrektorelemente entsprechend begrenzt ist. Tabelle 3.1 enthält die technischen Daten des Boosters im Überblick.

Tabelle 3.1: Daten des Boosters Bodo

Umfang	$U = 50,4 \text{ m}$
Dipole, lang (1,10 m, 20°)	16
Dipole, kurz (0,55 m, 10°)	4
Quadrupole (0,234 m)	6 Gruppen á 4
Anzahl der FODO Zellen	12
Beschleunigungsfrequenz	$f_{HF} = 499,8 \text{ MHz}$
HF-Resonator	DESY Typ, 3 zellig
HF-Senderleistung	$P_{HF} = 30 \text{ kW}$
Umlauffrequenz	$f_u = 5,95 \text{ MHz}$
Harmonischenzahl	$h = 84$

Optik und Magnetkonfiguration

Die Magnetanordnung von Bodo entspricht einer FODO Struktur mit zwei Symmetrieachsen und 12 FODO Zellen. D.h. horizontal fokussierende (F) und defokussierende (D) Magnete wechseln sich ab und sind je durch eine Driftstrecke getrennt (O) in welchen Dipole, Injektions-, Ejektionselemente oder der beschleunigende Hohlraumresonator angebracht sind. Im Vergleich zur Triplet Struktur von Delta läßt die FODO Struktur keine so starke Fokussierung des Strahls zu. Jedoch ist sie durch die geringere Energieabhängigkeit der Fokussierung, d.h. durch ihre kleinere Chromatizität, robuster gegen Energiefehler und Fehlaufstellung der Magnete. Vorallem bei sehr niedrigen Energien, wenn der Strahl nahezu ungedämpft ist, wirken sich geringste Störungen stark auf den Strahl aus. Die Magnetstruktur von Bodo wurde insofern als Kompromiß zwischen seiner Eignung als Booster und als Speicherring gewählt. Die 24 fokussierenden Magnete (Quadrupole) von Bodo sind unterteilt in drei horizontal fokussierende Familien à vier Quadrupolen und zwei vertikal fokussierende Familien mit vier bzw. acht Quadrupolen. Die acht Quadrupole der QD-Familie werden dabei über zwei Netzgeräte bestrahlt. Diese, im Gegensatz zu anderen Synchrotrons, vergleichsweise große Anzahl an Familien läßt eine flexible Einstellung der Optik zu.

Tabelle 3.2 enthält einige Kenngrößen der aktuellen Optik des Boosters (V.005):

Tabelle 3.2: Magnetoische Kenngrößen des Boosters (Optik V.005).

Parameter	Q_x	Q_z	α	Q'_x	Q'_z	$\langle \beta_x \rangle$	$\langle \beta_z \rangle$
Wert	2,83	2,26	0,116	-3,32	-1,88	3,8m	4,6m

Hochfrequenz-System

Zur Beschleunigung der Elektronen in Bodo wird ein dreizelliger Hohlraumresonator (*Cavity*) verwendet. Die Hochfrequenzleistung wird durch einen 500 MHz Sender bereitgestellt und über ein Hohlleitersystem eingekoppelt.

Der Sender liefert maximal 30 kW Ausgangsleistung im Dauerbetrieb. Die Injektion in das Synchrotron kann jedoch aufgrund von sogenannten Synchro-Betatron-Resonanzen nicht bei voller Hochfrequenz Leistung erfolgen. Deshalb muß die Leistung während des Zyklus mitgefahren werden. Dies geschieht, wie auch bei den Magnetnetzgeräten, über einen Führungsgrößen-generator (siehe Abschnitt 3.6.2).

Durch die hohe Shuntimpedanz des dreizelligen Hohlraumresonators wird eine gute Ankopplung des Strahls an die Hochfrequenzleistung gewährleistet. Dadurch induziert der Strahl jedoch auch ein großes Feld im Cavity, was wiederum störend auf den Strahl zurückwirken kann. Der Effekt wird *Beamloading* genannt.

3.4.3 Dynamik des Boosters

Wie bereits oben erwähnt, sind die Dynamikbereiche der einzelnen Netzgeräte sehr unterschiedlich. Zur Verdeutlichung soll hier ihre Funktionsweise kurz umrissen werden.

Hauptstromnetzgerät der Dipole

Die horizontale Ablenkung des Strahls im Booster geschieht über 16 Dipole mit 20° und 4 Dipolen halber Länge mit 10° Ablenkwinkel. Durch diese Anordnung ist der Sollstrom für alle Dipolmagnete im Booster in erster Ordnung identisch, so daß man sie in Reihe schalten und über ein Netzgerät betreiben kann. Der Gesamtwiderstand beträgt so $R_D = 314\text{ m}\Omega$, die Induktivität $L_D = 540\text{ mH}$ [Delt90].

Das Dipolnetzgerät der Firma Jäger liefert $I_{max} = 995\text{ A}$ und $U_{max} = +356\text{ V}$ sowie $U_{min} = -310\text{ V}$. Die maximale Aufladegeschwindigkeit ist durch die Überspannung des Netzgerätes gegeben und insofern von dem gewünschten Maximalstrom. Die Aufladekurve folgt der Funktion

$$I_a(t) = I_{a0} - I_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_{Dipole}}}$$

wobei $I_{a0} = U_{max}/R_D \approx 1135\text{ A}$ und das minimale $\tau_{Dipole} \approx 1,72\text{ s}$ Konstanten des Netzgerätes an seiner spezifischen Last $Z_D = i\omega L_D + R_D$ sind und I_0

vom Startwert der Aufladekurve abhängt.

Für die Entladekurve gilt analog

$$I_e(t) = I_{e0} + I_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_{Dipole}}}.$$

Die Netzgerätkonstante ist hier $I_{e0} = U_{min}/R_D = -983,6 \text{ A}$, d.h. das Netzgerät nimmt Energie aus dem LR-Kreis auf. In dieser Form ist leicht ersichtlich, daß bei hohen Endströmen die minimale Aufladedauer des Dipolkreises wesentlich über der minimalen Entladedauer liegt.

Beispiel Rampe von 68 auf 1500 MeV, d.h. von 40 auf 995 A

- 40 A \rightarrow 995 A: Dipole erreichen in 3,6 s den Endstrom
- 995 A \rightarrow 40 A: Dipole erreichen in 1,2 s den Endstrom

Choppernetzgeräte der Quadrupole

Der Ausgangsstrom wird über Strom-Pulse konstanter Höhe aber variabler Breite bei 14 kHz Wiederholrate geregelt. Das hat zur Folge, daß die Dynamik im aufsteigenden Teil der Rampe größer ist als im absteigenden. Die in den Quadrupolen gespeicherte Energie kann bei der Entmagnetisierung nicht vom Netzgerät aufgenommen werden. Die Rampe folgt dann der Zeitkonstante des LR-Kreises. Diese liegt, nur für die Quadrupole mit $L_{Qges} = 540 \text{ mH}$, $R_{Qges} = 551 \text{ m}\Omega$ bei $\tau_Q = L_{Qges}/R_{Qges} \approx 1 \text{ s}$. Da das unakzeptabel groß wäre, wird über eine spezielle Schaltung (siehe Abb. 3.2) ein Widerstand von $R_z = 7,5 \Omega$ in Reihe zugeschaltet. Dadurch läßt sich die Zeitkonstante auf $\tau_e \approx 0,067 \text{ s}$ reduzieren. Da der Strom über R_z nur durch die Freilaufdiode fließen kann, ist der effektive Wert von R_z durch den *duty-cycle* des 14 kHz Pulsbreitenregler gegeben. Öffnet der Regler, so fließt der Strom über die Stromquelle und nicht durch den Widerstand. Erst wenn der Regler schließt, fließt der Strom aufgrund der induktiven Last weiter, eben durch die Diode und den Widerstand. Man betrachte die beiden Extremfälle des schnellstmöglichen Anstiegs und des schnellstmöglichen Abfalls der Rampe. Für den ansteigenden Teil der Rampe kann der Regler voll öffnen (*duty-cycle*=100%). Das bedeutet, daß die Diode sperrt und der gesamte Strom aus der Stromquelle durch die Quadrupole fließt; damit folgt $R_e = R_{Qges} = 551 \text{ m}\Omega$.

Für die abfallende Flanke der Rampe kann der Regler schließen (*duty-cycle*=0%). Jetzt fließt der gesamte Strom über den Widerstand R_z und durch die Quadrupole, d.h. $R_e = R_{Qges} + R_z = 8,051 \text{ m}\Omega$.

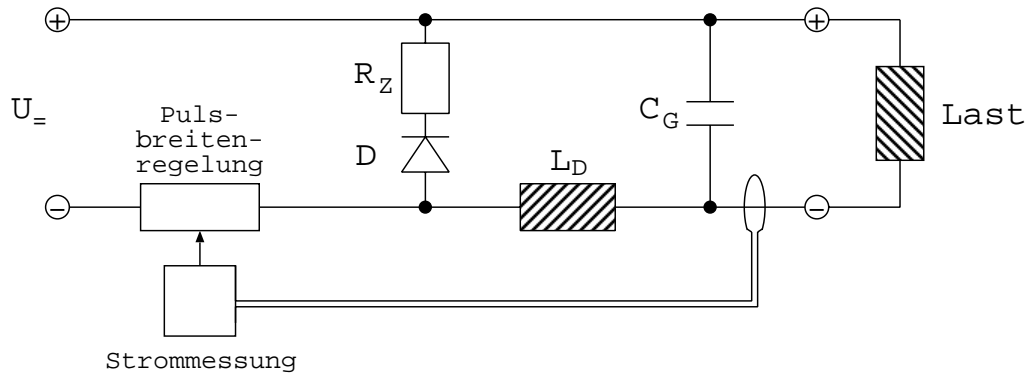


Abbildung 3.2: Vereinfachtes Schaltbild der Choppernetzgeräte. Die Stromregelung arbeitet nach dem Prinzip eines Zerahackers (engl.: Chopper): im Takt von mehreren Kilohertz wird mit der Pulsbreitenregelung die Eingangsspannung U_+ zu und weg geschaltet. Zur Erhöhung der Dynamik der Quadrupolnetzgeräte wurde der Widerstand R_Z eingeführt. Er wirkt nur bei weg geschalteter Eingangsspannung, wenn der Strom über die Diode fließt.

Dadurch ergeben sich unterschiedliche Zeitkonstanten für die ansteigende und abfallende Flanke der Rampe. Für erster gilt:

$$I_a(t) = I_{a0} - I_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_{Qa}}}$$

wobei $I_{a0} = U_{max}/R_{ges} \approx 254,1 \text{ A}$ und das minimale $\tau_{Qa} \approx 0,98 \text{ s}$ wiederum Konstanten sind und I_0 vom Startwert der Aufladekurve abhängt.

Für die Entladekurve gilt

$$I_e(t) = I_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau_{Qe}}}$$

mit $\tau_{Qe} = 0,067 \text{ s}$.

Beispiel Rampe von 68 auf 1500 MeV, das entspricht für die Bodo-005 Optik einer Stromrampe von 1,28 auf 30 A

- 1,28 A \rightarrow 30 A: ein Quadrupolkreis erreicht in 0,12 s den Endstrom.
- 30 A \rightarrow 1,28 A: ein Quadrupolkreis erreicht den Endstrom in 3,10 s bei $R_e = 551 \text{ m}\Omega$ bzw. in 0,22 s bei $R_e = 8,051 \text{ m}\Omega$.

Netzgeräte der Steuerspulen

Beim Design von Bodo wurden auch Steuerspulennetzgeräte vorgesehen. Um den Einbau eigener Ablenkmagnete zu vermeiden, werden die Dipolfelder durch Zusatzspulen auf den Quadrupolen erzeugt [Brin93]. Die Netzgeräte wurden baugleich mit den Netzgeräten für die Delta Steuerspulen gewählt. Es handelt sich dabei um unipolare DESY-Netzgeräte mit internem Polwender. Die Ansteuerung erfolgt über eine serielle Schnittstelle die wiederum über einen Feldbus mit einem Prozeßrechner verbunden ist. Beim Durchlaufen des Nullstromes betätigt das Netzgerät selbstständig seinen Polwender.

In der ersten Inbetriebnahmephase stellte sich jedoch heraus, daß sich mit ihnen nur eine geringfügige Verbesserung des Rampzyklus erreichen ließen. So machten sich die zusätzlichen Felder in den Quadrupolen erheblich in der Hysterese bemerkbar, womit sich eine Koppelung zwischen Orbit und Arbeitspunkt ergab. Außerdem stellte heraus, daß die Orbitverschiebungen auf der Rampe nicht zu Strahlverlusten führten. Zudem gab es Schwierigkeiten, die Ansteuerung für eine Orbitstabilisierung entlang der Rampe zu implementieren, da sich die Geschwindigkeit der seriellen Ansteuerung als zu gering herausstellte und eine Polwendung während der Rampe nicht in definierter Zeit ablief. Da die Netzgeräte zu diesem Zeitpunkt an anderer Stelle benötigt wurden, wurde beschlossen auf eine Orbitkorrektur an Bodo vorerst zu verzichten. Insofern wird eine entsprechende Steuerung nicht Teil dieser Arbeit sein. Die Orbitdiagnostik im Booster soll jedoch Aufschluß liefern, welche Anforderungen die neuen Netzgeräte erfüllen müssen.

Netzgeräte der Ejektionsbeulen

Die Ejektionsbeule des Boosters wird mit Hilfe von zusätzlichen Spulenpaaren auf drei Dipolen im Ejektionsbereich erzeugt. Die Netzgeräte sind einfache transistorgesteuerte, unipolare Stromquellen mit geringer Genauigkeit (ca. 1%). Ihre Ansteuerung erfolgt über Führungsgrößengeneratoren und Digital-Analog-Konverter (DACs).

3.5 Der Speicherring Delta

Der Speicherring ist als Synchrotronstrahlungsquelle der dritten Generation mit einer Magnetoptik ausgelegt, die es gestattet sehr kleine Emittanzen zu

erzeugen. Für die Nutzung als Synchrotronstrahlungsquelle stehen neben der Strahlung aus den Dipolen zwei lange Einbaustrecken für spezielle Magnete zur Erzeugung von Synchrotronstrahlung zur Verfügung. Bisher wurde eine Beamline an einem Dipol aufgebaut für die Mikrostrukturtechnik. Die ersten speziellen Magnete, welche zusammen in einer der Geraden installiert werden, sind der supraleitende asymmetrische Wiggler SAW und der Undulator U55. An dem Wiggler sind gleich drei Synchrotronstrahlungs-Beamlines geplant. Die Beamlines befinden sich zur Zeit im Aufbau und sollen für die Forschung in der Festkörperphysik genutzt werden.

In der zweiten Einbaustrecke ist ein Undulator für das Beschleunigerprojekt *Felicitä*¹ installiert, einen Free-Elektron-Laser, der als durchstimmbarer UV-Laser seine Energie aus dem gespeicherten Strahl bezieht und Pulse höchster Photonendichte liefert. Am FEL-Undulator befindet sich außerdem eine Beamline, die vom Forschungszentrum Jülich unter der Leitung von Prof. Dr. W. Eberhard [Eber96] aufgebaut wurde.

3.6 Das DELTA Kontrollsystem

Die Architektur des DELTA Kontrollsystems entspricht dem „Standard-Modell“ für Anlagensteuerungen (siehe Kapitel 1.2). Im folgenden Abschnitt soll grob die Software-Architektur des DELTA Kontrollsystems erläutert werden. Der darauffolgende Abschnitt geht auf Hardware des DELTA Kontrollsystems ein, insbesondere auf die zur Steuerung der Rampen verwendeten Führungsgrößengeneratoren.

3.6.1 Software-Architektur

Im Folgenden soll eine grobe Übersicht der DELTA Kontrollsystem Architektur gegeben werden. Für eine detailliertere Darstellung sei auf [Bier93b] und [Isgö96] verwiesen.

Beim Einschalten eines Prozeßrechners lädt dieser von einem UNIX-Rechner – dem *Boot-Server* – sein System, seine Konfigurationsdaten und die für diesen Rechner benötigten Geräteapplikationen (siehe Abb. 3.3). Aus

¹Free Electron Laser in a circular Test Accelerator

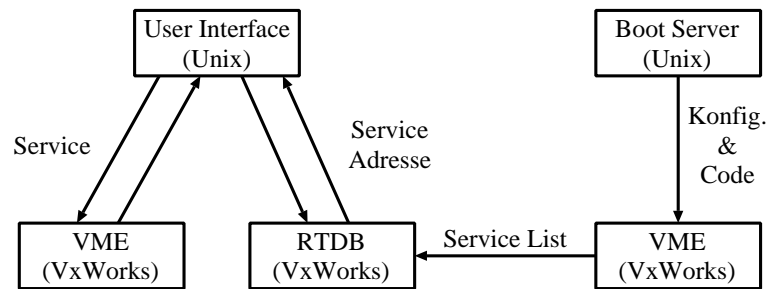


Abbildung 3.3: *Client-/Server-Struktur* des DELTA Kontrollsystems. Zur Bootzeit erhalten die VME-Rechner ihre Konfigurationsdaten und den Programmcode von einem *Boot-Server*. Nach erfolgreicher Initialisierung melden sie die von ihnen unterstützten *Services* bei einer Datenbank, der *Realtime Database* (RTDB) an. Diese arbeitet als *Service-Server*, der bei *Service-Anfragen* durch ein *User-Interface* die Adresse des zuständigen VME-Rechners weitergibt.

seiner Konfiguration geht hervor, welche Geräte (*Devices*) sich ansprechen lassen und welche Funktionen (*Attribute*) sie besitzen. Diese *Service-Liste*, bestehend aus *Device-Attribut* Paaren, meldet der Prozeßrechner daraufhin bei der Echtzeit-Datenbank (RTDB) an. Wenn nun von einem Displayrechner ein Client auf ein bestimmtes *Device-Attribut* Paar zugreifen will, so fragt er als erstes bei der Echtzeit-Datenbank nach, welcher Rechner für diesen Service zuständig ist. Die Verbindung wird dann vom Client zum VME-Server des Prozeßrechners hergestellt, der wiederum die entsprechende Geräte-Applikation startet (siehe Abb. 3.4). Danach können Daten in beide Richtungen zwischen Client und Geräte-Applikation übertragen werden.

Die Schnittstelle für den Netzwerkzugriff auf die Geräte-Applikationen über den *Device-Attribut* Namen steht für unterschiedliche Generierung von Benutzerschnittstellen zur Verfügung. So existiert ein UNIX Kommandozeilenbefehl `call`, welcher sowohl auf den UNIX-Rechnern, wie auch unter VxWorks auf den Prozeßrechnern zur Verfügung steht. Graphische Benutzeroberflächen werden weitgehend mit Tcl/Tk (siehe Abschnitt 1.2.1) erstellt. In den Tcl/Tk Interpreter wurde zur Steigerung der Performance die Schnittstelle für den Netzwerkzugriff direkt integriert. Um von C/C++ Programmen auf die Geräte-Applikationen zuzugreifen, steht eine Schnittstellenbibliothek zur Verfügung. Diese ermöglicht auch den Zugriff von Geräte-Applikationen untereinander.

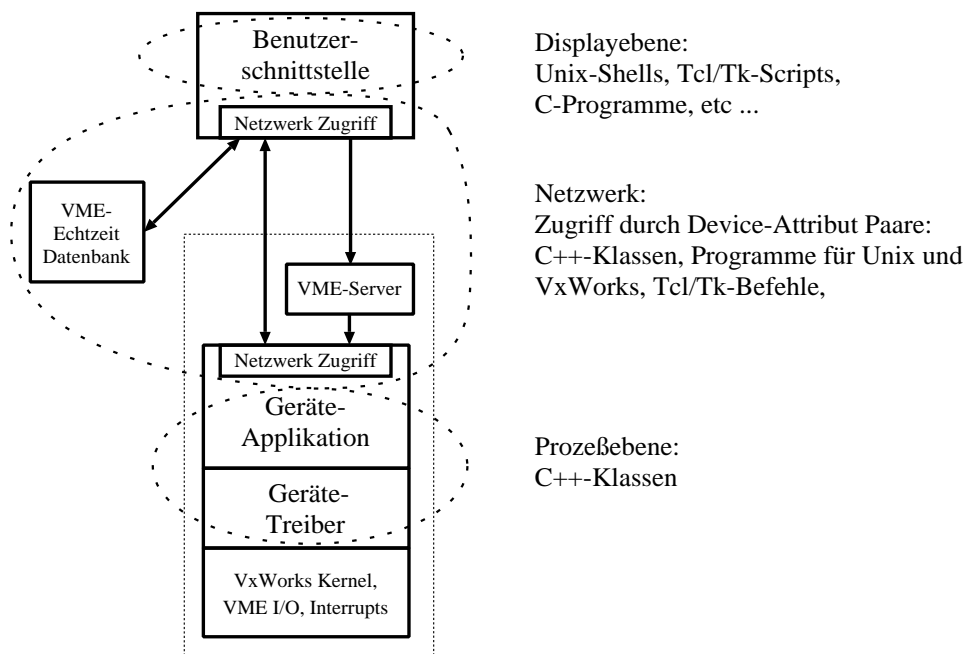


Abbildung 3.4: Die Software-Ebenen des DELTA Kontrollsystems

3.6.2 Hardware

In der Darstellungsebene werden UNIX Workstations und X-Terminals eingesetzt. Als Prozeßrechner finden VME Rechner mit dem Echtzeit-Betriebssystem VxWorks Verwendung. Zur Verbindung der Rechner untereinander wird Thin Ethernet eingesetzt, ein serieller Bus mit 10 MBit pro Sekunde Übertragungsgeschwindigkeit. Die Geräte werden mit den Prozeßrechnern im wesentlichen über den seriellen CAN Feldbus verbunden. Zur Auslese und Steuerung von Standard Laborgeräten, wie Digitalen-Sampling-Oszilloskopen oder Frequenzgeneratoren wird der in diesem Bereich gebräuchliche GP-IB Bus eingesetzt. Für einige Anwendungen werden auch VME Ein-/Ausgabe Karten eingesetzt, wie z.B. ein Analog-Digitalkonverter für die Stromauslese im Speicherring oder spezielle Karten zur Steuerung der Magnet-Rampen des Boosters, sogenannte Führungsgrößengeneratoren.

Führungsgrößengeneratoren für den Rampzyklus

Die Vorgabe der individuellen Kurven für den Zyklus erfolgt durch Führungsgrößengeneratoren (FGs). Diese, an DELTA entwickelten VME Karten, erlauben die digitale Vorgabe nahezu beliebiger stetiger Funktionen [Bier93a]. Für die Dipole und Quadrupole müssen zueinander proportionale Magnetfelder erzeugt werden, welche bis auf weniger als ein Promille voneinander abweichen. Die digitale Sollwertvorgabe und die Umwandlung in einen Analogwert sind auf 16 *Bit* Genauigkeit ausgelegt. Bei einem Maximalstrom der Quadrupole von 60 A entspricht das 16. Bit einer 0,3 ‰ Variation bei 75 MeV.

Da das dynamische Verhalten der Netzgeräte und die unterschiedliche Hysterese der Quadrupole zu berücksichtigen ist, sind die Soll-Kurven für diese Netzgeräte nicht vollständig proportional, d.h. die einzelnen Quadrupolfamilien müssen individuelle Kurvenvorgaben bekommen.

Neben Rampkurven für Dipol- und Quadrupolkreise werden auch die Kurven für die Ejektionsbeule und die Hochfrequenzleistung über Führungsgrößengeneratoren erzeugt. Bei diesen sind jedoch die Genauigkeitsanforderungen wesentlich geringer.

Zur Zeit sind FGs im Einsatz für

- den Dipolkreis,
- die sechs Quadrupolnetzgeräte,
- die drei Ejektionsbeulennetzgeräte und
- die Leistung der Hochfrequenz.

Kapitel 4

Konzept für die Steuerung und Diagnostik von Bodo

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die Steuerung und Diagnostik für das Booster-Synchrotron Bodo definiert. Das hier ausgearbeitete Konzept legt dar, auf welche Weise sich die Zustände des Boosters parametrisieren lassen, welche Diagnostik zur Messung dieser Zustände entwickelt werden muß und was bei dem Entwurf der graphischen Benutzeroberflächen zur Steuerung des Boosters zu beachten ist.

4.1 Spezielle Anforderungen an das Konzept im Rahmen von DELTA

Wie im vorigen Kapitel ausgeführt wurde, liegt die Hauptaufgabe des Boosters in der Beschleunigung der Elektronen für die Teilchenakkumulation im Speicherring Delta. Bei der Konzeption der Steuerung und Diagnostik des Akkumulationsprozesses muß besonderes Augenmerk auf die Zielsetzung von DELTA als Testmaschine liegen. Als solche sind die Anforderungen an die Flexibilität der Anlagensteuerung sehr hoch. So soll die Akkumulation im Speicherring bei beliebigen Energien zwischen 100 und 1500 MeV, mit beliebigen Füllstrukturen und bei verschiedenen Einstellungen der Magnetoptik erfolgen können. Des weiteren soll die Anlagensteuerung einen schnellen Wechsel zwischen den unterschiedlichen Modi erlauben.

Der Booster Bodo soll ebenfalls als Testfeld für Beschleunigerphysik dienen, z.B. für Untersuchungen zum Aufbau kompakter Synchrotronstrahlungsquellen oder für das Studium der Teilchenakkumulation bei niedrigen Energien [Delt90]. Gute Werkzeuge zur Analyse des Akkumulationsprozesses sind nicht nur nötig zur Optimierung des Prozesses, sondern auch, um zu

einem tieferen Verständnis über die dynamischen Vorgänge in einem Booster-Synchrotron, besonders im Niedrigenergiebereich, zu gelangen.

Eine weitere Besonderheit von DELTA stellt das Spektrum der Maschinenoperateure dar. Es reicht von studentischen Hilfsoperatoren, die bereits nach kurzer Einarbeitung in der Lage sein müssen, den Beschleuniger zu steuern, bis hin zu Beschleunigerphysikern, welche Zugriff auf alle Parameter der Maschine und detaillierte Diagnose-Möglichkeiten erwarten.

Durch diese Anforderungen ergeben sich drei Schwerpunkte für das Konzept. Den ersten Schwerpunkt stellt die Handhabung der vielfältigen Maschinenzustände dar. Dazu wird die Parametrisierung und Beschreibung der Maschinen im Hinblick auf den Akkumulationsprozeß betrachtet. So soll die Anzahl der Parameter für die dynamischen Zustände auf ein physikalisch sinnvolles Maß reduziert werden und es soll eine abstrahierte Zustandsbeschreibung gefunden werden, welche eine Gliederung und Bewertung der Maschinenzustände erlaubt. Für die Bewertung des Akkumulationsprozesses werden Gütefunktionen definiert.

Als zweiter Punkt wird die Sensorik spezifiziert, welche zur Überwachung, Bewertung und Analyse des Boosters und der Bewertung und Steuerung des Akkumulationsprozesses nötig ist.

Der dritte Aspekt ist das Design der prozeßspezifischen, graphischen Benutzerschnittstellen, das den unterschiedlichen Nutzerprofilen Rechnung tragen soll.

4.2 Parametrisierung des Akkumulationsprozesses

4.2.1 Dynamische Sollzustände

Während ein statischer Sollwert eines Einzelgerätes meist unmittelbar als Wert vorliegt, z.B. der Sollstrom eines Netzgerätes oder die Ladespannung eines Pulsers, so ist die Datenmenge einer dynamischen Sollwertvorgabe nicht eindeutig vorgegeben. Hier ist eine Parametrisierung des dynamischen Zustandes nötig, welche die Anzahl der Freiheitsgrade auf ein physikalisch sinnvolles Maß beschränkt.

Für den Boosterzyklus benötigen elf Geräte in drei Gruppen eine dynamische Vorgabe des Sollwertes:

Energierampe: Für die eigentliche Energierampe werden ein Dipolstromkreis und sechs Quadrupolstromkreise synchron gefahren.

Ejektionsbeule: Drei Netzgeräte erzeugen eine langsame Orbitbeule im Booster für die Ejektion.

HF-Leistung: Die beschleunigende Hochfrequenzleistung muß für die Injektion niedrig sein ($< 100\text{ W}$) und bei ca. 300 MeV auf die für die Endenergie benötigte Leistung gesetzt werden.

Für die Energierampe der Magnete muß darauf geachtet werden, daß die Netzgeräte entsprechend der Zeitkonstanten ihrer induktive Lasten gefahren werden. Die natürliche Rampenform hierfür ist die Auf- und Entladekurve eines L/R-Kreises. Wie allerdings in Abschnitt 3.4.3 ausgeführt wurde, sind die optimalen Kurven für die Quadrupole andere als für den Dipolkreis. Bei niedrigen Energien sind die Choppernetzgeräte der Quadrupole langsamer, bei hohen Energien das Hauptstromnetzgerät der Dipole. Ein Kompromiß ist eine lineare Rampe, welche mit parabolischen Stücken zu einer stetig differenzierbaren Kurve zusammengesetzt wird. Die parabolischen Stücke können zur Anpassung der Kurven an die unterschiedliche Dynamik der Netzgeräte verwendet werden.

Die geforderte Feldproportionalität der verschiedenen Magnetkreise zueinander ist so hoch, daß Unterschiede in den Hystereseeigenschaften durch geeignete Korrekturfunktionen der Sollströme ausgeglichen werden müssen. Ziel der Korrektur ist ein stabiler Arbeitspunkt während der Energierampe, um Strahlverluste zu vermeiden. Für die Korrektur des horizontalen und vertikalen Arbeitspunktes ist je eine Korrekturfunktion für die fokussierenden und defokussierenden Quadrupolkreise ausreichend. Die Korrekturen für die Quadrupole gegenüber dem Dipolkreis liegen im Bereich bis zu einigen Prozent und sollen durch eine stetige, aus linearen Stücken zusammengesetzte Funktion vorgegeben werden. Um sich mit der Anzahl der Stützstellen dieser Funktion nicht im vorherein einzuschränken, bietet sich die Vorgabe einer Stützstellenliste $\{t_i; \frac{\Delta I}{I}\}$ variabler Länge an.

Für die Sollwert-Vorgaben der Ejektionsbeule und die HF-Leistungskurve sind aus linearen Stücken zusammengesetzte Funktionen ausreichend.

Die Rampen für alle Netzgeräte bilden zusammen ein Ramp-Setup. Neben den Daten der Sollwertkurven wird die Dynamik des Boosterzyklus auch

durch einige weitere Timing-Parameter, wie Triggerzeitpunkte für In- und Ejektion sowie der Periodendauer der Rampe, beeinflusst. Diese sollen zusammen mit dem Ramp-Setup gespeichert werden.

4.2.2 Definition der Gütefunktionen

Ein theoretischer Maschinenzustand, wie er z.B. aus einer Simulation abgeleitet wird, muß erst an der realen Maschine optimiert werden. Zu dieser Optimierung benötigt man als Kriterium zur Bewertung des Zustandes einen Gütemaßstab.

Für den Akkumulationsprozeß ist, die Zunahme des Strahlstroms durch die Zeit \dot{I}_A ein sinnvolles Gütemaß. Aufgrund der Strahlstromverluste durch die begrenzte Lebensdauer nimmt \dot{I}_A jedoch mit zunehmendem Strahlstrom im Speicherring ab. Um eine weitgehende strahlstromunabhängige Größe zu erhalten, kann statt dessen die momentane Zunahme des Strahlstromes durch die Injektion ΔI_{Delta} gemessen werden.

Es sei also:

$$G_0 \equiv \Delta I_{\text{Delta}} \quad (4.1)$$

Diese Güte läßt sich für eine bessere Zuordnung in Güten für die einzelnen Beschleuniger zergliedern:

$$G_0 = G_{\text{Gun}} G_{\text{Linac}} G_{\text{Inj.Bodo}} G_{\text{Ramp}} G_{\text{Transfer}}. \quad (4.2)$$

Eine praktikable Wahl der Güten ist folgende:

Bewertung der Gun: Als Güte der Elektronenkanone wird die Pulsladung der Gun Q_G verwendet.

$$G_{\text{Gun}} \equiv Q_G \quad (4.3)$$

Bewertung des Linac: Als Güte des Linearbeschleunigers wird der Transmissionskoeffizient ϵ_{Linac} verwendet.

$$G_{\text{Linac}} \equiv \epsilon_{\text{Linac}} = \frac{Q_L}{Q_G} \quad (4.4)$$

Bewertung der Injektion in den Booster: Ein gutes Maß ist das Verhältnis der Ladungsmenge in Bodo zur Ladungsmenge Q_L , welche der Linac anbietet.

$$G_{\text{Inj.Bodo}} = \frac{Q_{\text{Inj.Bodo}}}{Q_L} \quad (4.5)$$

Bewertung des Ramp-Vorgangs: Der Ramp-Vorgang soll über den Strahlstrom-Verlust während der Rampe definiert werden.

$$G_{\text{Ramp}} = \frac{Q_{\text{Extr.Bodo}}}{T_Z \cdot Q_{\text{Inj.Bodo}}} \quad (4.6)$$

Bewertung des Transfers von Bodo nach Delta: Wie bei der Injektion stellt das Verhältnis des Stromzuwachses im Speicherring relativ zum extrahierten Strom ein angebrachtes Gütemaß hierfür dar.

$$G_{\text{Inj.Delta}} = \frac{\Delta I_{\text{Delta}}}{Q_{\text{Extr.Bodo}}} \quad (4.7)$$

Um aussagekräftige Werte für die Bewertung von Maschinenzuständen zu erhalten, müssen neben den aktuellen Gütemaßen auch zeitliche Mittelwerte berechnet werden.

4.2.3 Reproduktion von Maschinenzuständen

Ein Sollwert-Datensatz (kurz *Setup*) muß zur späteren Reproduktion des Maschinenzustandes gespeichert werden können. Für eine effiziente Reproduktion eines Maschinenzustandes müssen die Maschinenzustände systematisch geordnet sein, um dem Operator die Auswahl des richtigen Setups zu erleichtern. Dabei ist es nicht ausreichend, lediglich jedem Setup einen Kommentar hinzuzufügen, da dieser Kommentar zwar eventuell im Kontext der Schicht eindeutig ist, jedoch Tage oder Monate später für einen anderen Operator nur unzureichende Informationen enthält.

Die Ordnung des Setups geschieht über die Maschinenkomponente (z.B. Linac, T1, ...) und über physikalische Schlüsselwörter. Die Schlüsselwörter – im Folgenden *State*-Variablen genannt – sind nach einem physikalischen Maschinenparameter benannt und haben einen Wert, der den zugehörigen Maschinenzustand beschreibt. Z.B. für eine Booster Rampe „Bodo-Optic V006“

oder für ein Setup der Quadrupole und Dipole im Speicherring Delta „Delta-Energy 1300MeV“. Die Speicherung dieser Wertepaare erlaubt, jederzeit den aktuellen Zustand der gesamten Maschine – eben repräsentiert durch die physikalische Schlüsselwörter und ihre Werte – abzufragen.

Indem zu jedem Setup die durch die Maschinengruppe beeinflussten *State*-Variablen mit ihrem aktuellen Wert abgespeichert werden, läßt sich mit dem Wiederherstellen des Setups zu einem späteren Zeitpunkt automatisch der globale Maschinenzustand aktualisieren.

Da es für eine Maschinenkomponente viele verschiedene Setups mit identischen Zustandswerten geben kann, müssen zur weiteren Differenzierung noch beschreibende Daten hinzugefügt werden. Neben den erreichten Gütewerten der Maschinenkomponente sind auch Kommentare über Randumstände, wie „39°C-Hallentemperatur“ hilfreich. Soweit als möglich sollen die Informationen automatisch mitgeschrieben werden.

4.3 Diagnostik für den Akkumulationsprozeß

Die Diagnostik für den Akkumulationsprozeß muß drei Bereiche abdecken. Die Diagnose von Gerätefehlern, die Messung der Gütefunktionen und die Meßmethoden zur Prozeßanalyse, d.h. die Messung der beschleunigerphysikalischen Parameter.

4.3.1 Diagnose von Gerätefehlern

Für den Rampzyklus des Boosters benötigt man eine Gerätediagnose, die es ermöglicht, die Dynamik des Gerätes mit den Sollwertvorgaben zu vergleichen. Neben den Netzgeräten des Boosters ist vor allem die Dynamik der Cavity-Hochfrequenzleistung zu überwachen. Ein Fehler des Hochfrequenz-Systems wie z.B. in der Leistungsstellung oder eine ungewollte Verstimmung des Cavities, ist nur schwer über die Strahldiagnostik zuzuordnen und bedarf somit dringend einer eigenen Überwachung. Dabei ist es nicht die Zielsetzung, eine Messung in der Auflösung der Gerätespezifikationen zu ermöglichen, da dazu in der Regel ein sehr hoher Aufwand nötig ist. Als Beispiel sei hier das Hauptstromnetzgerät der Dipole angegeben, welches nach Spezifikation einen relativen Fehler von 10^{-5} hat. Für diese Meßauflösung benötigt man

bei einer Rampe von 995 A auf 40 A in 1,2 s (siehe Beispielrampe im Abschnitt 3.4.3) einen ADC von mindestens 17 Bit rauschfreier Auflösung und eine Digitalisierung mit Abtastraten von 8 kHz. Vielmehr sollen die Messungen grobe Abweichungen von den Sollwertvorgaben detektieren, welche auf einen Gerätefehler schließen lassen.

4.3.2 Diagnose der Gütefunktionen

Um die unter Abschnitt 4.2.2 definierten Gütefunktionen zu bestimmen, müssen folgende Werte gemessen werden:

- Ladungsmenge des Gun Pulses
- Ladungsmenge nach dem Linac
- Ladungsmenge im Booster
 - unmittelbar nach der Injektion
 - unmittelbar vor der Ejektion
- Im Speicherring gespeicherte Ladungsmenge
 - vor der Injektion
 - nach der Injektion

Statt der Ladungsmengen mißt man einfacher mittlere Ströme oder Pulsströme. Für eine bekannte Pulsstruktur sind diese jedoch zu den Ladungsmengen proportional. Für DELTA sind unterschiedliche Gun-Pulser im Einsatz: für den Hochstrombetrieb des Speicherrings wird ein 90 ns Pulser verwendet, für höchste Stromdichten – z.B. beim FEL-Betrieb – wird dagegen ein 2 ns Pulser verwendet. Da die Strommessung abhängig von der Pulsstruktur ist, muß eine Kalibration der Messungen vorgesehen werden.

4.3.3 Diagnostik zur Analyse des Akkumulationsprozesses

Neben den Parametern der Gütefunktionen, welche zunächst geringe Anforderungen an die Diagnostik stellen, muß auch die in Abschnitt 2.3 beschriebene umfassende Diagnostik zur Verfügung stehen. Denn die Gütefunktionen liefern nur Ort und/oder Zeitpunkt einer Qualitätsstörung; um auch ihre Ursache zu finden, sind weitere diagnostische Methoden erforderlich. Für den

Boosterzyklus ist es notwendig, daß diese Methoden eine dynamische Messung ermöglichen. Auch wenn der Booster prinzipiell bei jeder Energie im Zyklus gestoppt werden kann, so spiegelt der dann eingenommene statische Zustand nicht zwangsläufig den dynamischen Zustand wieder, den der Booster bei gleicher Energie im Zyklus hat.

Wesentliche Strahlparameter sind, wie bereits im Kapitel 2.3 erläutert:

Strahlstrom: Zur Bestimmung der Transmissionen muß die Messung hinter der Gun, dem Linac, im Booster und im Speicherring erfolgen. Für Gun und Linac sind gepulste Messungen nötig; im Booster sollte die Messung mit einem Bruchteil der Zeitkonstante der Magnetkreise erfolgen, d.h. mit ca. 10 Hz; im Speicherring muß die zeitliche Auflösung ausreichen, den Zuwachs durch die Injektion von den Lebensdauerverlusten zu trennen.

Orbit: Im Booster ist der Orbit sowohl zum Zeitpunkt der Injektion, als auch der Ejektion interessant und die Entwicklung des Orbits während der Rampe. Für eine ausreichende Auflösung des Orbits im Booster sind mindestens 12 Positionen erforderlich, die Dynamik wird – wie beim Strahlstrom – mit 10 Hz hinreichend charakterisiert. Im Transferkanal T2 sind Lage und Winkel des Eintritts und Ausganges interessant, d.h. insgesamt sind vier Positionsmonitore sinnvoll. Für den Speicherring sind neben den Closed-Orbit Monitoren noch *first-turn* Monitore für die Analyse der Injektion nötig.

Arbeitspunkt: Da eine Arbeitspunktverschiebung häufig Ursache für einen Strahlverlust ist, sollte die Abtastrate des Arbeitspunktes bei etwa 50 Hz liegen, um bereits die Tendenz des Arbeitspunktes vor dem Verlust aufzulösen.

Chromatizität: Die Chromatizität im Booster wird über den Arbeitspunkt bestimmt. Wenn sie auch bei der FODO Struktur des Beschleunigers keine kritische Größe darstellt, so kann sie Aufschluß über höhere Multipole im Beschleuniger liefern.

Emittanz: Die Entwicklung der Emittanz liefert Aufschluß über Strahlaufweitungen durch unterschiedlichste Einflüsse. Während resonante Anregungen bereits über die Arbeitspunktmessung abgedeckt werden, können auch die Einflüsse des Restgases auf den Strahl und Effekte anderer Instabilitäten nachgewiesen werden.

4.4 Aufgabenorientierte graphische Benutzeroberflächen

Bei der Steuerung und Diagnostik von Bodo kann man zwei Anwendungen unterscheiden. Zum einen den Service der Strahlstromakkumulation im Speicherring. Dafür benötigt man eine kompakte graphische Benutzeroberfläche, welche die Überwachung und Steuerung des Prozesses ermöglicht. Diese Aufgabe sollte auch von Anfängern bewältigt werden können, die kein Detailwissen über die Anlage besitzen, wie z.B. an DELTA studentische Hilfsoperateure. Zum anderen benötigt man Werkzeuge, die die beschleunigerphysikalische Untersuchung des Akkumulationsprozesses ermöglichen. Diese Werkzeuge wenden sich vornehmlich an den Beschleunigerphysiker, d.h. den ausgewiesenen Experten, so daß besonderes Augenmerk auf schnelle Bedienung und flexible Durchführung der Meßaufgaben gelegt werden sollte. Außerdem sind für diese Anwendungen Schnittstellen zu gängiger Simulations- und Datenverarbeitungssoftware vorzusehen, um die Weiterverarbeitung der genommenen Daten zu erleichtern.

Des weiteren soll auf einige graphische Benutzeroberflächen für allgemeine Service-Anwendungen an DELTA eingegangen werden, wie das Speichern und Wiederherstellen von Setups oder Steuerung und die Skalierung von Gerätegruppen.

4.4.1 Der Akkumulationsservice

Die Steuerung der Akkumulation beinhaltet folgende Punkte:

- Steuerung des Ablaufs der Akkumulation
- Beurteilung und Optimierung des Maschinenzustandes
- Speicherung und Wiederherstellung des Maschinenzustandes

Die Steuerung muß neben Start und Stopp der Akkumulation auch die Einstellung der Elektronen-Füllstruktur des Speicherrings ermöglichen, d.h. der Zeitstruktur des gespeicherten Strahls. Für den Speicherring Delta ist eine flexible Einstellung der Füllmuster wichtig, um die unterschiedlichen Anforderungen der Experimente zu erfüllen. Als Beispiel seien der Betrieb mit 4

äquidistanten Bunchen im Ring für den FEL Betrieb und die 3/4-Füllung für den Hochstrombetrieb genannt. Die Erzeugung dieser Füllmuster muß über das Timing der Injektion in den Booster und den Speicherring geschehen.

Zusätzlich sollten spezielle Modi zur Optimierung der einzelnen Beschleuniger zur Verfügung stehen, welche den Speicherring nicht beeinflussen.

Zur Beurteilung des Maschinenzustandes werden die Gütefunktionen nach Abschnitt 4.2.2 verwendet. Für die Darstellung der Gütewerte ist zu berücksichtigen, daß die zugrundeliegenden Messungen mit absoluten Fehlern behaftet sind. Dadurch können die berechneten Güten bei kleinen Strömen sehr große Fehler besitzen. Der Fehler der Güte muß deshalb unbedingt aus der Darstellung ersichtlich sein. Das läßt sich über eine Darstellung des geschätzten Fehlers bewerkstelligen oder durch die Definition von Anzeigeschwellen bzw. farblicher Kennzeichnung.

4.4.2 Die Akkumulationsanalyse

Für die Analyse des Akkumulationsprozesses muß die unter Abschnitt 4.3.3 beschriebene Diagnostik ausgelesen und visualisiert werden.

Diese diagnostischen Programme sind im wesentlichen für die Benutzung durch Beschleunigerphysiker vorgesehen. Insofern kann das Wissen über die Bedeutung der Daten vorausgesetzt werden und erfordert keine ausführlichen Hilfefunktionen. Es sollte bei ihrem Design Wert gelegt werden auf eine einfache und schnelle Bedienbarkeit, flexible und kompakte Darstellung und eine Schnittstelle zur Weiterverarbeitung durch Simulationsprogramme.

4.4.3 Allgemeine Service–Applikationen

Setup-Browser

Das Speichern und Wiederherstellen der Maschinenzustände sollte auf verschiedene Weisen geschehen können. So will ein Operateur für die Zwischenspeicherung eines Zustandes eventuell nicht erst eine graphische Benutzeroberfläche aufrufen, sondern bevorzugt das Speichern über ein Kommando, was wesentlich schneller von statten gehen kann. Dagegen benötigt man zum

Wiederherstellen eines Maschinenzustandes einen Überblick von den vorhandenen gespeicherten Zuständen, der besser graphisch vermittelt werden kann.

Wie in Abschnitt 4.2.3 erläutert wurde, muß die graphische Benutzeroberfläche die gespeicherten Setups sowohl nach der Maschinenkomponente, als auch nach den Schlüsselwörtern selektieren können. Zusätzlich ist das Datum ein wichtiger Gliederungsschlüssel.

Anzeige des Maschinenzustandes

Die Definition der physikalischen Schlüsselwörter aus Abschnitt 4.2.3 ermöglicht eine prägnante Beschreibung des aktuellen Maschinen-Sollzustandes. Zusammen mit dieser Beschreibung sollte eine Historie nachgehalten werden, wie dieser Zustand eingenommen wurde, d.h. wann zuletzt eine Maschinenkomponente durch das Laden eines Setups in einen definierten Zustand versetzt wurde und wann zuletzt der Zustand der Maschinekomponente als Setup gesichert wurde.

Generische Gerätegruppensteuerung

Für unterschiedliche Gerätegruppen mit ähnlicher Funktionalität sollte sich die Steuerung weitgehend gleichen. Eine effiziente Form, das zu erreichen ist eine generische graphische Benutzeroberfläche. Diese kann mit dem Namen einer Gerätegruppe gestartet werden und paßt sich dann in Aussehen und Funktionalität den Möglichkeiten der einzelnen Geräte dieser Gruppe an. So wird die Steuerung der Geräte bezüglich ihrer gemeinsamen Funktionalität immer identisch sein, und lediglich die Auswahl, welche Funktionalität zur Verfügung steht, variiert von Gerät zu Gerät.

Eine solche Oberfläche muß folgende Basisfunktionalitäten unterstützen:

Sollwert-Variation: der Sollwert für jedes einzelne Gerät der Gruppe muß durch die Oberfläche gezielt verändert werden können.

Sollwert-Skalierung: die gesamte Gerätegruppe muß um einen einstellbaren Faktor skaliert werden können.

Ein-/Ausschalten: die einzelnen Geräte sowie die gesamte Gerätegruppe muß, soweit die Geräte diese Funktionalität kennen, ein- bzw. ausgeschaltet werden können.

Speichern/Laden von Setups: für die Gerätegruppe sollten durch die Oberfläche Setups abgespeichert bzw. geladen werden können.

Anzeige von Gerätefehlern: sowohl Fehler beim Zugriff auf die Geräte, als auch Soll-/Istwert Abweichungen außerhalb der spezifischen Toleranzen sollen dargestellt werden.

Polling: periodisches Abfragen der Soll- und Istwerte, um die dargestellten Werte aktuell zu halten soll unterstützt werden.

Hilfen: Bereitstellung von Hilfen zur Bedienung und Erklärung der Bedeutung von Meldungen und farblichen Kennzeichnungen.

4.4.4 Konsistente Darstellung des Gerätezugriffs

Die Visualisierungsdaten werden wie der Gerätezugriff über den *Device-Attribut* Namen zugeordnet. Die notwendigen Daten für die Visualisierung ergeben sich aus Abschnitt 4.4.3 und den allgemeinen Forderungen zur konsistenten Darstellung aus Abschnitt 1.1.3:

Wertebereich: der Bereich der Sollwerte, verbindlich für die Steuerung (Min.- und Max.-Wert).

Schrittweite: kleinster sinnvoller Variationsschritt.

Toleranz: maximale tolerable relative Abweichung zwischen Soll- und Ist-Wert, Überschreitung führt zur Warnung.

Format: Formatierung der Soll- und Istwerte.

Einheit: Zeichenkette zur Kennzeichnung der physikalischen Einheit des Wertes.

Kapitel 5

Realisierung des Konzeptes an DELTA

Im Folgenden soll die Realisierung des Konzeptes, wie es im vorangegangenen Kapitel entwickelt wurde, am Booster-Synchrotron Bodo dargestellt werden. Zuerst wird darauf eingegangen, was im Rahmen dieser Arbeit unternommen wurde, um die dynamischen Maschinenzustände des Boosters als Hauptbeschleuniger für DELTA zu parametrisieren. Des weiteren wird dargestellt, welche Verbesserungen an der Diagnostik vorgenommen wurden, um das Konzept zu realisieren. Abschließend werden die graphischen Benutzeroberflächen vorgestellt, die vom Autor entworfen und programmiert wurden, um den Betrieb und die Analyse des Boosters auf effiziente Weise zu ermöglichen.

5.1 Parameter des Akkumulationsprozesses

5.1.1 Rampendefinition und Initialisierung

Abbildung 5.1 zeigt die gewählte Grundform für die Energierampe der Dipol- und Quadrupolnetzgeräte. Sie besteht aus abwechselnd linearen und parabolischen Abschnitten, welche durch ihre Dauer und die Forderung eines stetig differenzierbaren Übergangs bestimmt sind. Für die einzelnen Netzgeräte müssen dann nur noch Minimal- und Maximalwert vorgegeben werden, wobei letztere für die Quadrupole auch aus der Skalierung relativ zum Dipolwert gewonnen werden können.

Die Korrekturen für die Quadrupolfamilien zur Stabilisierung des Arbeitspunktes werden in Form einer Stützstellenliste variabler Länge vorgegeben. Zwischen den Stützstellen wird dann linear extrapoliert. D.h. die Korrekturliste $\{t_i; \kappa_i \equiv \frac{\Delta I}{I}\}$ führt eine Korrektur des Sollstroms $I_0(t)$ nach

$$I(t) = I_0(t) \cdot \left(1 + \kappa_i + (t - t_i) \frac{\kappa_{i+1} - \kappa_i}{t_{i+1} - t_i} \right) \quad \text{mit} \quad t_i \leq t < t_{i+1}$$

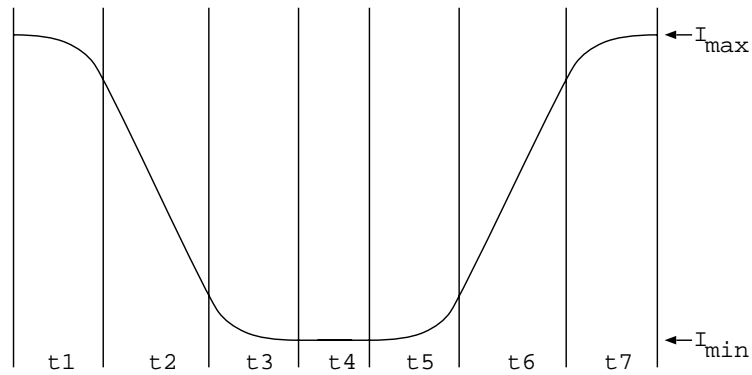


Abbildung 5.1: Die Zeitdauern $t_1 - t_7$ definieren zusammen mit dem maximalen Sollstrom I_{\max} und dem minimalen Sollstrom I_{\min} komplett die Rampenform. Dabei sind für alle Netzgeräte die Zeiten identisch, lediglich die extremalen Sollströme unterscheiden sich.

durch. Die Kurven für die Ejektionsbeule und die HF-Leistung, die nicht der Grundform entsprechen, werden ausschließlich durch diese Korrekturfunktionen realisiert. Dazu wird bei diesen die Grundform durch Gleichsetzen des Minimal- und Maximalstromes unterdrückt.

Das Rampen-Setup enthält folgende Daten:

- Name des Timingsetups
- Liste der zu initialisierenden Geräte
- Anzahl Stützstellen für den Führungsgrößengenerator
- Zeiten zur Definition der Rampengrundform
- Minimal und Maximalwerte aller Geräte (Wahlweise relativ definierbar)
- Definitionen von Gerätegruppen
- Korrekturlisten für Gerätegruppen

Zur Definition der einzelnen Parameter sind diese über Schlüsselwörter definiert, z.B. „Imax QD1 Rel Dipole“ oder „Timingsetup InjTiming/timing.6.4s“. Für die Initialisierung einer neuen Rampe wird das

Rampen-Setup von einem Programm gelesen und interpretiert. Eine einmal initialisierte Rampe kann angehalten und erneut gestartet werden, ohne daß eine erneute Initialisierung notwendig wird. Die Initialisierung benötigt pro Gerät nur etwa 100 ms, da die 10 Parameter pro Rampe erst auf Prozeßebene in eine Kurve aus über 8000 Punkten umgewandelt werden.

5.1.2 Gütemaße

Die Daten zur Berechnung der Gütemaße werden synchron zum Zyklus durch die Echtzeit-Applikation **CallAfterInj** gelesen. Die Applikation läuft auf dem Prozeßrechner, auf dem die Applikation **TransTrigger** den Start der Injektion in den Booster auslöst. Sobald ein Triggersignal gegeben wurde, nimmt **CallAfterInj** in konfigurierbaren Zeitabständen die Daten für die Transmissionsberechnungen auf. D.h. Strahlstrom zu Beginn und am Ende des Linearbeschleunigers, injizierter Strahlstrom im Booster, Strahlstrom im Booster und im Speicherring kurz vor der Ejektion und Strahlstrom im Speicherring nach der Injektion. Die Wartezeiten zwischen den Messungen werden automatisch aus dem eingestellten Timing für die Injektion in den Booster und den Transfer der Teilchen zum Speicherring berechnet. Durch die Datennahme über eine Echtzeit-Applikation ist sichergestellt, daß alle aufgenommenen Daten zu einem Zyklus gehören. Zusätzlich wird noch eine fortlaufende Zyklusnummer zu den Daten abgespeichert. So können die Daten bei der Weiterverarbeitung durch die verschiedenen Anwendungen auch im nachhinein noch einem Zyklus zugeordnet werden.

5.1.3 Sicherung und Wiederherstellung von Maschinenzuständen

Für die Speicherung von Maschinenzuständen – den sogenannten Setups – werden die Geräte in Klassen gruppiert. Neben den Klassen die eine gesamte Maschinenkomponente repräsentieren, wie z.B. den *Linac*, *T1*, *T2*, *Delta* sind auch Klassen für einzelne Subkomponenten definiert, wie etwa *Delta-Dipole* oder *HF-500MHz*. Bei der Speicherung eines Setups über den Befehl **SaveStdSetup** wird der Name des Setups automatisch generiert. Er besteht aus einem Prefix für die Gerätegruppe, dem Datum und einer fortlaufenden Nummer.

Die Definition der Klassen erfolgt durch Files, welche eine Liste aller zugehörigen *Device-Attribut* Paare enthalten. Zusätzlich enthalten die Files Schlüsselwörter. Folgende Schlüsselwörter sind definiert:

#!STATE: <State-Variable>

Definition einer *State*-Variablen.

#:ASK <Frage>

Frage an den Operateur bei der Speicherung eines Setups; Frage und Antwort werden als Kommentar abgespeichert.

#:SAVEIST <Device> <Attribut>

Als Kommentar abzuspeichernder Istwert.

#:SAVESOLL <Device> <Attribut>

Als Kommentar abzuspeichernder Sollwert.

#:STDPREFIX <Prefix>

Prefix für die Generierung des Setupnamens.

Mit diesen werden die zusätzlichen Informationen gewonnen, die für eine Einordnung und spätere Bewertung des Setups notwendig sind. Ist für ein Setup eine *State*-Variable definiert, so wird der aktuelle Zustand dieser Variable mit dem Setup in der Form:

#!STATE: <State-Variable> <State-Wert>

abgespeichert. Diese Zeile sorgt dafür, daß bei der späteren Wiederherstellung des Setups die entsprechende *State*-Variable wieder auf den zum Setup gehörigen *State*-Wert gesetzt wird. Außerdem wird sie von der graphischen Benutzeroberfläche `setupbrowser.tcl` (siehe Abschnitt 5.4.6) verwendet, um Setups nach zugehörigen <State-Variable>,<State-Wert>-Paaren zu filtern.

5.1.4 Ablaufsteuerung der Akkumulation

Zur Steuerung des Ablaufs der Akkumulation wurde eine Timing-Elektronik aufgebaut, welche die Erzeugung beliebiger Füllmuster im Speicherring zuläßt [Lüde98]. Abbildung 5.2 stellt das Funktionsschema der Elektronik dar. Sie erzeugt Triggersignalfolgen für die Injektion in den Booster und des Transfers zum Speicherring. Durch die Verschiebung der kompletten zweiten Folge um ganze Booster-Umläufe kann – aufgrund des Verhältnisses 7:16 der Harmonischenzahlen von Booster zu Speicherring – in 16 äquidistante Stellen des Speicherringes injiziert werden. Durch das Verschieben der ersten Folge

Linac: Ein nicht zyklischer Mode, in dem die Gun und der Linearbeschleuniger permanent mit einer festen Frequenz $\frac{100Hz}{n}$ getriggert werden.

Bodo: Es erfolgt je eine Injektion in den Booster pro Start-Signal.

Delta: Die Injektion erfolgt wie im Bodo-Modus, zusätzlich wird ein Ejektions-Signal mit der Verzögerung `ExtrTime` erzeugt.

Für den Delta-Modus kann man entweder eine Bucketnummer *BucketNo* vorgeben in die injiziert werden soll, oder zwei Parameter (*Patternlength*, *Bucketstep*), welche für eine automatische Steuerung des Füllmusters durch die Applikation genutzt werden. Die automatische Füllung erfolgt nach der Sequenz:

$$BucketNo_{i+1} = ((BucketNo_i + Bucketstep) \% Patternlength),$$

wobei der Operator „%“ den Rest der ganzzahligen Division bezeichnet.

Um zum Beispiel eine äquidistante 4-Bunch-Füllung zu erzeugen, stellt man die Werte *Patternlength* = 144 und *Bucketstep* = 48 ein; eine 3/4-Füllung des Speicherrings erreicht man mit den Werten *Patternlength* = 144 und *Bucketstep* = 1.

5.2 Realisierung der Gerätediagnostik

Für die Geräte mit statischen Sollwerten ist bereits durch die Definition der Toleranz-Werte (siehe Abschnitt 4.4.4) die Grundlage für eine Aufdeckung von Fehlzuständen geschaffen. Bei Abweichungen außerhalb der Toleranz wird der Sollwert in der generischen graphischen Steueroberfläche rot dargestellt. Die Verwendung wird im Abschnitt 5.4.7 erläutert. Für die dynamischen Sollzustände wurden zeitauflösende Messung geschaffen, die Abweichungen der Istwerte von den Sollkurven detektieren können.

5.2.1 Dynamische Messung der Hochfrequenzleistung

Abbildung 5.3 zeigt das Schema des Meßaufbaus. Um die Hochfrequenz im Booster dynamisch zu messen, wird die Leistung über ein Schleife im Cavity

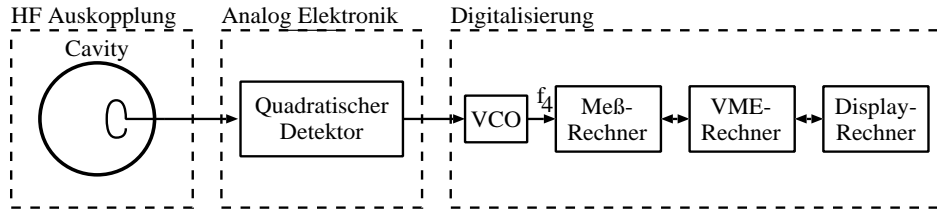


Abbildung 5.3: Für die Messung der Hochfrequenzleistung wird die am Cavity ausgekoppelte Spannung über einen quadratischen Detektor in eine Gleichspannung proportional zur Leistung umgewandelt. Digitalisiert wird diese Gleichspannung, indem sie erst in eine spannungsproportionale Frequenz umgewandelt und dann durch einen Meßwert-Computer gezählt wird.

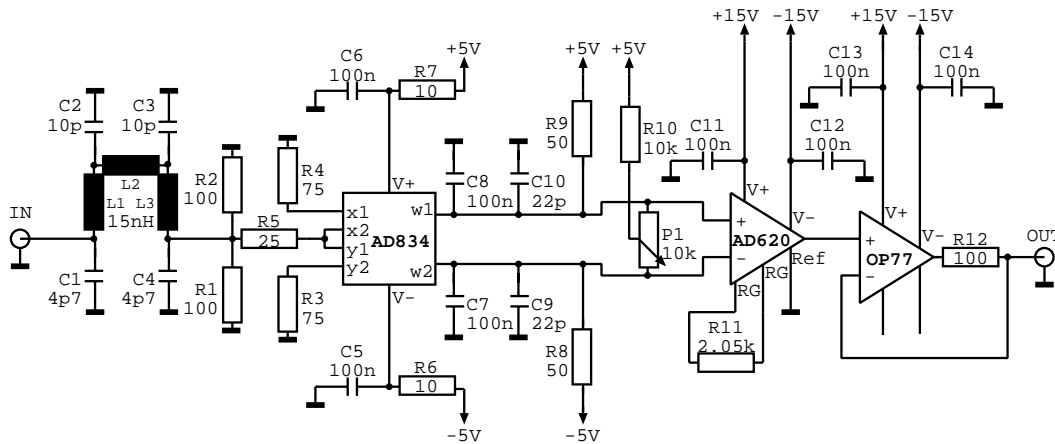


Abbildung 5.4: Funktionsschaltbild des quadratischen Detektors für die Hochfrequenz-Leistungsmessung. Die Quadrierung der Hochfrequenz über den AD834 erzeugt einen Gleichspannungsanteil proportional zur Leistung: $\sin^2(\omega t) = \frac{(1+\cos(2\omega t))}{2}$. Der AD620 wandelt die Stromdifferenzgänge des AD834 in eine Gleichspannung um. Der Hochfrequenzanteil wird mittels der Kondensatoren $C7$ bis $C10$ ausgefiltert, der Gleichspannungsanteil über den OP77 weiter verstärkt.

ausgekoppelt. Um die ausgekoppelte Leistung zu messen wird ein quadratischer Detektor eingesetzt (siehe Abb. 5.4). Das so gewonnene Signal wird über einen Spannungs-Frequenz Wandler in eine Frequenz zwischen 100 Hz und 10 MHz umgewandelt und über einen Zähler in 20 ms-Intervallen digita-

lisiert. Zusammen mit anderen Größen wird die Meßwertfolge mittels eines Meßcomputers aufgenommen (siehe Abschnitt 5.3.2).

5.2.2 Soll-/Istwert Vergleich der Rampennetzgeräte

Zum Soll-/Istwert Vergleich der Rampennetzgeräte werden die Soll-Ströme auf Prozeßebene mit einer Frequenz von 50 Hz mit den Ist-Strömen, wie sie über einen ADC zurückgelesen werden, verglichen. Die Echtzeit-Applikation der Netzgeräte wurde dazu um das Attribut „Diagnose“ erweitert, was alternativ die Rücklese der Liste „ t_i ; $I(soll)_i$; $I(ist)_i$ “ ermöglicht, oder eine Flag-Rückgabe, ob irgendeine Abweichung jenseits der konfigurierten Tolleranz vorliegt.

5.3 Diagnostik zur Bestimmung der Strahlparameter

5.3.1 Orbitmessung

Die Orbitmessung beruht auf einer bei DELTA entwickelten Elektronik (siehe [Brin91] oder [Jank97]). Es wurden verschiedene Modifikationen an der analogen und digitalen Signalverarbeitung durchgeführt, um eine Auslese der 14 Strahlpositionsmonitore mit einer Bandbreite von ca. 50 Hz und einer Abtastrate von 10 Hz zu ermöglichen.

Analoge Signalverarbeitung

In Abbildung 5.5 ist das Prinzip der Strahllagemesselektronik dargestellt. Die Elektronik mißt die Signalhöhen der vier Pickups eines Monitors bei einer Frequenz von 500 MHz, d.h. der beschleunigenden Hochfrequenz¹. Die vier Signale werden über dieselbe Auswerteelektronik verarbeitet, um in jedem Fall gleiche Verstärkungsfaktoren zu garantieren. Das wird erreicht, indem ein PIN-Dioden Schalter nacheinander die Signale der Pickups auf die Auswerteelektronik legt. Synchron dazu wird die aus der Verarbeitung resultierende Gleichspannung über einen Demultiplexer auf den entsprechenden

¹Diese Frequenzkomponente ist immer im Spektrum des Strahls enthalten.

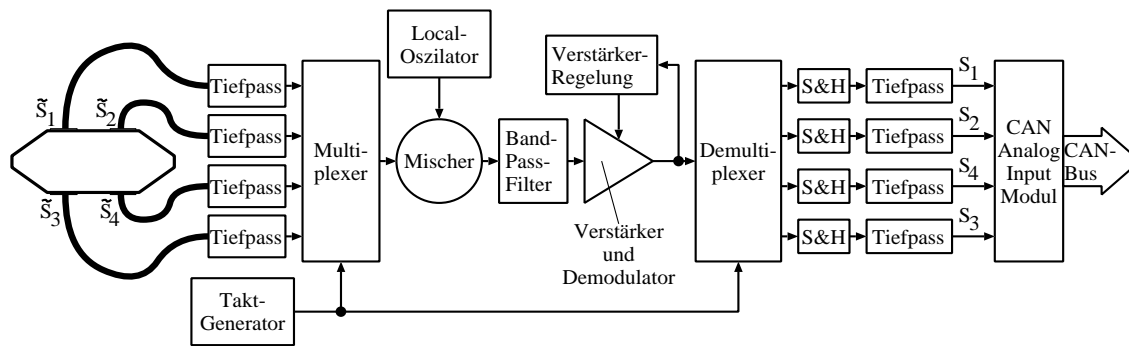


Abbildung 5.5: Funktionsschema der Strahlage-Ausleseelektronik. Alle 4 Pickups eines Strahllagemonitors werden über dieselbe Elektronik ausgewertet, um die Proportionalität der Signale zu erhalten. Für die dynamisch Messung mußten die Ausgangstiefpässe und der Taktgenerator angepaßt werden.

*Sample and Hold*² Ausgang geschaltet. Die vier Ausgänge der *Sample and Hold* Bausteine werden über einen Tiefpass auf ein CAN-Bus Modul mit Analogeingängen gegeben.

Die Signalhöhenauswertung geschieht im wesentlichen in drei Stufen. Zuerst wird das Signal auf die Zwischenfrequenz von $10,7\text{ MHz}$ gemischt. Dann filtert ein schmalbandiger Bandpaß-Filter alle störenden Mischprodukte heraus. Zuletzt wird das Signal über einen Verstärker mit integriertem Demodulator gleichgerichtet. Eine Verstärker-Regelung sorgt dafür, daß das mittlere Signal am Ausgang bei einer konstanten Spannung gehalten wird.

Die Dynamik der Elektronik wird durch verschiedene Zeitkonstanten bestimmt. Zum einen durch die Regelgeschwindigkeit der Verstärker-Regelung. Diese ist dafür ausgelegt, den Dynamikbereich des Speicherings abzudecken, d.h. Stromvariationen von 1 mA bis zu mehreren 100 mA zu kompensieren. Andererseits muß diese Regelgeschwindigkeit weit unter der Takt-Generator Geschwindigkeit liegen, welche die Multiplexer und Demultiplexer schaltet, um zu verhindern, daß sie die unterschiedlichen Signalhöhen der Kanäle ausregelt. Zum dritten werden durch den Tiefpaß an den Ausgängen maximale Änderungsfrequenzen festgelegt.

²Eine Schaltung, welche auf einen Trigger hin ein Eingangssignal abtastet (*Sample*) und den Ausgang danach auf diesem Wert hält (*Hold*).

Da die Elektronik in ihrer ursprünglichen Version für den quasistatischen Einsatz am Speicherring entwickelt wurde, mußten für den Einsatz beim Synchrotron einige Modifikationen vorgenommen werden. So erzeugte der Taktgenerator einen 400 Hz Takt, d.h. jeder Kanal wurde 2,5 ms gemessen und 7,5 ms gehalten. Des weiteren war der Tiefpaß an den Ausgängen auf eine Zeitkonstante $\tau = 140 \text{ ms}$ eingestellt. Zusätzlich wurde letztere Zeitkonstante über Kondensatoren mit einer hohen Fertigungstoleranz (+50%–30%) bestimmt, wodurch die Zeitkonstanten real von Kanal zu Kanal um bis zu einem Faktor 1,5 schwankten.

Während das für statische Messungen alles nicht von Bedeutung ist, waren dynamische Messung bei Frequenzen $> 1 \text{ Hz}$ nur qualitativ durchführbar. So stellte die Samplingfrequenz des Taktgenerator eine Begrenzung der maximal aufzulösenden Frequenz nach dem Samplingtheorem von 25 Hz dar. Viel entscheidender noch waren aber die Tiefpaßfilter des Ausgangs. Diese unterdrückten die Messung von Strahlbewegungen ab ca. 7 Hz. Außerdem produzierte die Streuung zwischen den Kanälen frequenzabhängige Faktoren, d.h. eine explizite Abhängigkeit der gemessenen Strahlposition von der Geschwindigkeit der Strahlbewegung. Abbildung 5.6 stellt die Orbitmessung vor und nach der Veränderung der Tiefpassfilter an einem Monitor gegenüber. Die Orbitdaten wurden hierfür über mehrere Zyklen gesammelt. Um die gewünschte Meßauflösung von 10 Hz zu garantieren, wurde die Zeitkonstante des Ausgangs-Tiefpasses auf 2 ms reduziert. Dadurch ergibt sich eine Grenzfrequenz von 500 Hz, wodurch gleichzeitig der Einfluß der Streuung von Kanal zu Kanal reduziert wird. Zusätzlich wurde der Tiefpaß mit Kondensatoren höherer Genauigkeit ($\pm 10\%$) aufgebaut, um die Streuung selbst zu reduzieren. Die Taktgeneratorfrequenz wurde auf 1 kHz erhöht. Die Kalibrationsmessungen der Monitore vor und nach der Modifikation sind in [Lüde97a] aufgeführt. Aus ihnen ist ersichtlich, daß Schwingungen bis 10 Hz nahezu ungedämpft aufgelöst werden und bei 50 Hz lediglich 3 dB Dämpfung vorliegen.

Digitale Signalverarbeitung

Die digitale Weiterverarbeitung der Meßdaten war zu Beginn der Inbetriebnahme des Boosters quasistatische Auslese ausgelegt. Die Analogsignale $S_1 - S_4$ der Strahllegeelektronik wurden über CAN-Bus Analog-Input Module mit einer festen Rate von 1 Hz digitalisiert und an einen Prozeßrechner

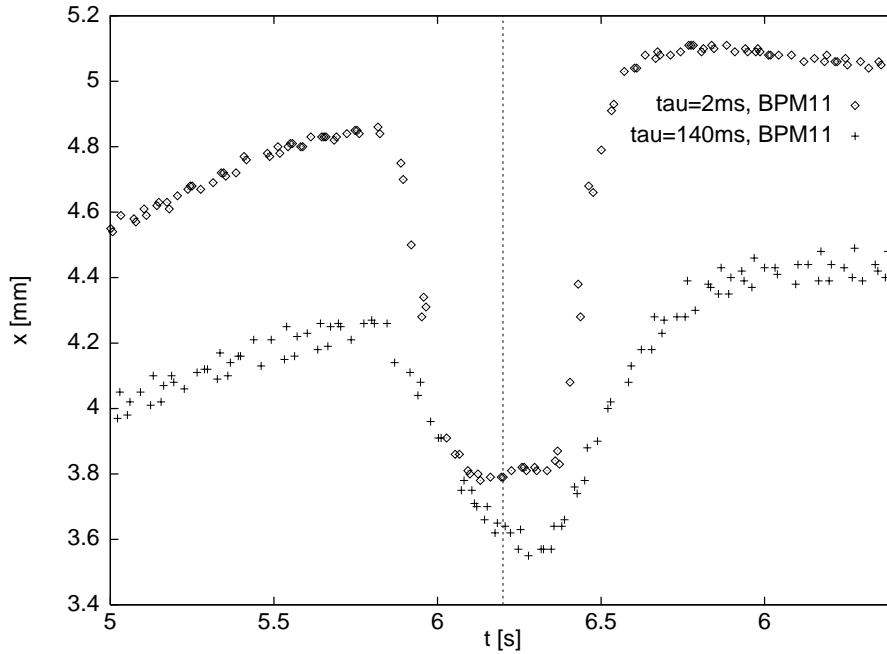


Abbildung 5.6: Orbitmessung an Monitor BPM11 vor und nach Modifikation des Ausgangs-Tiefpasses. Zu sehen ist eine Orbitverschiebung durch eine Ejektionsbeule. Der nominelle Ejektionszeitpunkt ist durch eine Linie gekennzeichnet. Deutlich ist die höhere Bandbreite der Messung nach der Reduktion der Zeitkonstante τ der Ausgangstiefpässe zu erkennen.

weitergeleitet. Die Prozeßrechner Software war darauf ausgelegt, den jeweils zuletzt empfangenen Wert auf Anforderung an die Displayebene zu schicken. Dort gibt es eine graphische Benutzeroberfläche, welche die aktuellen Daten wahlweise für den Booster oder den Speicherring darstellt. Orbitverschiebungen konnte man nur mit dem Auge verfolgen. Eine Zuordnung der Orbitdaten zu bestimmten Zeitpunkten auf der Rampe war somit nur sehr grob möglich.

Für die zeitauflösende Messung wurden alle drei Kontrollsystemebenen angepaßt. Die CAN-Bus Module wurden auf eine Rate von 10 Hz programmiert. Die Applikation in der Prozeßebene versieht die empfangenen CAN-Bus Daten mit einer Zeitmarke relativ zum Beginn des letzten Zyklus. Da die vollständigen Orbit-Daten für einen Zyklus meist nicht notwendig sind

und es somit eine unnötige Netzwerk-Belastung wäre, sie an die Displayebene zu schicken, lassen sich auf der Prozeßebene verschieden Filter vorgeben, um Daten auszuwählen. Man kann wählen, ab welchem Zeitpunkt, relativ zum Beginn der Rampe, und wieviele Daten pro Monitor aufgenommen werden sollen. Die Geräte Applikation **BPMApp1** zur Orbitauslese und die von ihr unterstützten *Attribute* werden in [Lüde97b] näher erläutert.

5.3.2 Arbeitspunktmessung im Booster

Zu Beginn der Inbetriebnahme des Beschleunigers wurden die Arbeitspunkte mit Hilfe eines Spektrumanalysators gemessen [Kamp96]. Die *swept-frequency* Methode lieferte eine maximale Meßrate von 4 *Hz*, wobei aufgrund des meist sehr geringen Signal-Rausch-Abstands in der Regel noch eine Mittelung über mehrere Messungen erforderlich war. Die effektive Rate lag dadurch bei einem Arbeitspunkt pro Sekunde. Für eine Messung auf der Rampe ergab sich das zusätzliche Problem, daß sich der Signal-Rausch-Abstand bei einem sich bewegenden Arbeitspunkt durch Mittelung nicht verbessern läßt. Insofern war dieses Verfahren für eine Messung auf einer Rampe ungeeignet. Daher wurde eine Analog-Elektronik entwickelt, welche eine Aufnahme des Strahlspektrums mit einer Rate von 20 *Hz* nach dem *swept-frequency* Verfahren erlaubt (siehe Abb. 5.7 und [Dunk96]). Der Signal-Rausch-Abstand dieses Aufbaus wurde sukzessive soweit erhöht, daß schon bei geringem Strom im Booster (ab 200 μA) die Bewegung des Arbeitspunktes während des Rampzyklus beobachtet werden kann. Die Echtzeit-Darstellung des Spektrums auf einem Bildschirm, analog zum Spektrumanalysator jedoch mit 20 *Hz*, läßt jedoch noch keine Zuordnung der Arbeitspunktverschiebungen mit einer Auflösung von 50 *ms* zu, solange man für diese Zuordnung auf sein Auge angewiesen ist. Deshalb wurde in einer weiteren Ausbaustufe ein Meßcomputer zur Digitalisierung des Spektrums aufgebaut [Walt98]. Dieser ermöglicht über 8 Frequenzzählereingänge die Aufnahme weiterer Daten, zusammen mit dem Spektrum. Durch die Spektrumsanalyse auf dem Meßcomputer lassen sich die Arbeitspunkte für jeden Rampzyklus bestimmen und weiterverarbeiten. Weitere Modifikationen an der Analog-Elektronik ermöglichen jetzt eine Messung mit 50 *Hz* bei einer Frequenzauflösung von 5 *kHz* entlang der kompletten Rampe. Ein Überblick über den kompletten Aufbau zeigt Abbildung 5.8.

Die Auswertung des Spektrums geschieht bereits im Meßcomputer, der über einen einfachen Algorithmus die Peaks im Spektrum bestimmt und die

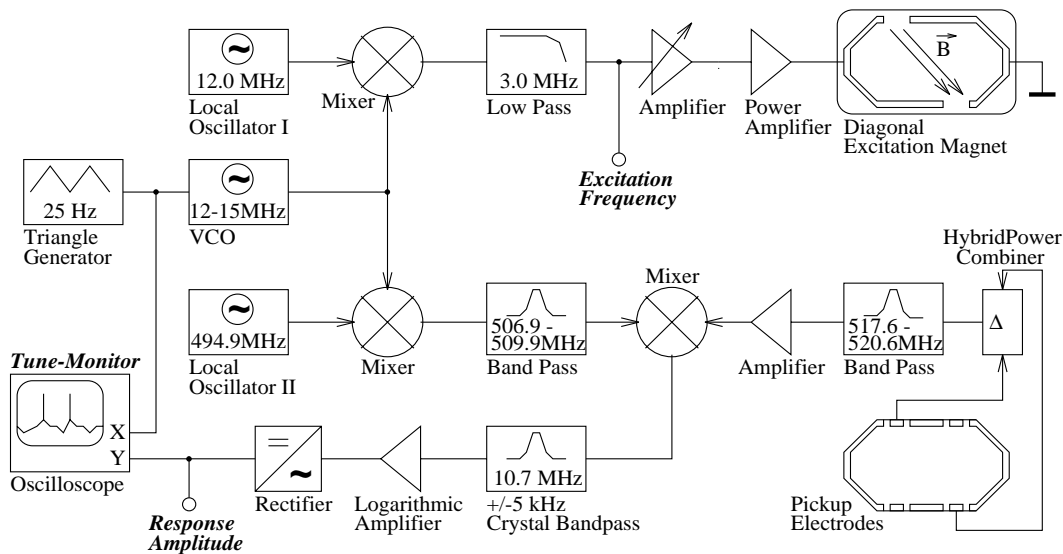


Abbildung 5.7: Analoge Elektronik zur dynamischen Arbeitspunkt-messung am Booster. Das Strahlschwingungssignal wird aus dem Differenzsignal zweier Pickupknöpfe des Strahlmeßsystems durch passive resonante Verstärkung bei der 87. Harmonischen ($517,6\text{ MHz}$) und einen Hybrid-Differenzbildner gewonnen. Zur Weiterverarbeitung wird das Signal auf eine Zwischenfrequenz von $10,7\text{ MHz}$ heruntergemischt und über einen logarithmischen Verstärker gleichgerichtet. Die Elektronik mißt nach dem *swept-frequency* Verfahren die Schwingung des Strahls in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz. Die Anregungsfrequenz wird mit einem 25 Hz Dreieckssignal moduliert. Für die Messung ergibt sich so eine Rate von 50 Hz (Abb. aus [Dunk97]).

ermittelten Betatronfrequenzen zusammen mit Meßwerten von zusätzlichen Frequenzzählereingängen an einen Prozeßrechner weiterleitet. Der Meßcomputer erhält ein Triggersignal zu Beginn eines Rampzyklus und versieht die Daten mit einer relativen Zeitmarke bezüglich dieses Triggers. Die Datennahme kann auf ein Zeitintervall beschränkt werden; dies geschieht über ein Steuerkommando des Prozeßrechners. Das hat den Vorteil, daß die durch den Arbeitsspeicher gegebene Begrenzung auf ca. 10 s Sampledauer bei langen Rampen nicht zu Problemen führt. Außerdem kann man so die Datennahme auf die Zeit von der Injektion bis zur Ejektion beschränken. Neben der Peakfrequenz wird auch die Peakhöhe an den Prozeßrechner übermittelt. Sie kann verwendet werden, um die Zuverlässigkeit der Messung einzuschätzen

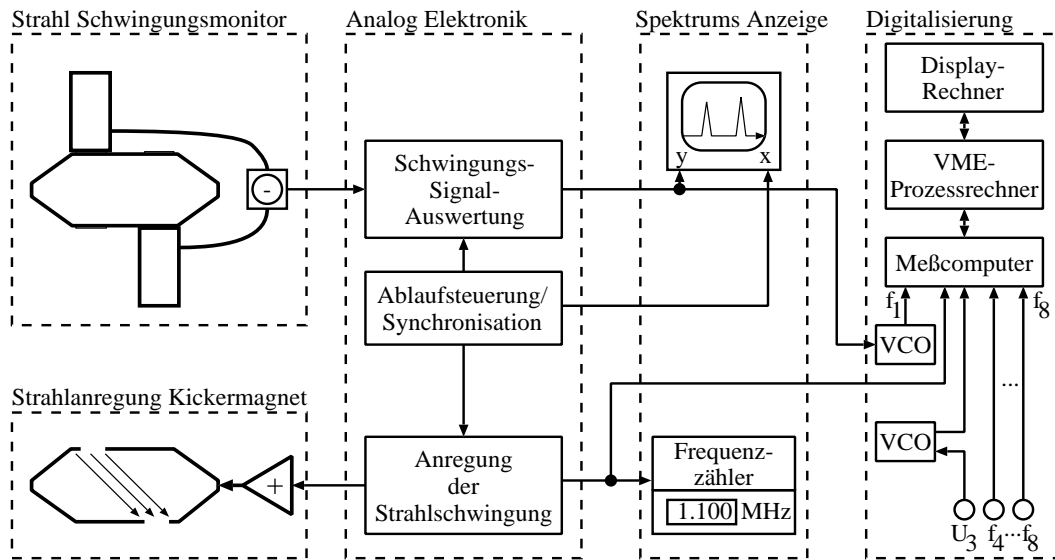


Abbildung 5.8: Schema des Meßaufbaus zur dynamischen Arbeitspunktbestimmung am Booster. Die Analog-Elektronik mißt mit einer Rate von bis zu 50 Hz die Schwingung des Strahls in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz. Mit Hilfe des Meßcomputers wird das Spektrum ausgewertet. Die ermittelten Betatronfrequenzen werden zusammen mit Meßwerten von zusätzlichen Frequenzzählereingängen an einen Prozeßrechner weitergeleitet. Dieser bereitet die Daten in ein lesbares Format um und hält sie abrufbar.

und so eventuell einzelne Meßwerte als Rauschen zu verwerfen. Die Applikation sendet auf Anfrage jeweils die gemessenen Daten des letzten Zyklus; die Daten stehen ca. eine Sekunde nach Abschluß der Messung bereit. Die Geräte Applikation *qvadis* und die Datenvorverarbeitung durch den Meßcomputer wird in [Walt98] und [Lüde99] näher beschrieben.

5.3.3 Strahlstrommessungen

Für die Messung des Strahlstromes im Booster ist ein *Integrating-Current-Transformer* (ICT) der Firma Bergoz in eine spezielle Monitorkammer eingebaut. Er liefert nach dem Prinzip eines Pulstransformators, einen Spannungspuls der zur Ladung des Strompulses proportional ist. Der Spannungspuls hat für Strompulse $< 10\text{ ns}$ immer die gleiche Form, so daß die

Pulshöhe proportional zur Ladung des durchfliegenden Bunches ist. Für längere Pulse (90 ns Pulser) muß die Messung neu kalibriert werden. Dafür wurde eine eigene Kalibrationsleitung um den Pulstransformatorkern des ICT installiert, welche die Messung eines definierten Strompulses ermöglicht.

Im Speicherring Delta wird der Strom über einen *Parametric-Current-Transformer* (PCT) der Firma Bergoz gemessen. Dieser liefert nur den mittleren Strom, jedoch bei beliebigen Füllstrukturen und mit sehr hoher Genauigkeit (Fehler $< 10 \mu A$ [Berg99]).

Aus dem ICT Signal müssen im wesentlichen zwei Werte für die Gütefunktionen gewonnen werden: der Strahlstrom kurz nach der Injektion und kurz vor der Ejektion. Für die Diagnose des Rampzyklus ist es zusätzlich wichtig, den Zeitpunkt von Strahlstrom Verlusten auf der Rampe zu messen.

Für die beiden Probleme wurden verschiedene Ansätze gewählt. Zur Bestimmung des Injektions- und Ejektions-Strahlstromes wird die Peak-Höhe des Spannungspulses vom *Integrating Current Transformer* über ein digitales Sampling-Oszilloskop ausgelesen. Dieses ist über einen GP-IB Bus mit einem Prozeßrechner verbunden. Die Applikation `CallAfterInj` auf dem Prozeßrechner ermöglicht die Auslese des Oszilloskop zu einem festen Zeitpunkt relativ zur Injektion. Gleichzeitig wird über diese Applikation der Strahlstrom in Delta vor und nach der Injektion ausgelesen, um daraus die Gütefunktion für den Transfer nach Gleichung 4.7 zu berechnen.

Um die Strahlstrom Verluste während der Rampe aufzunehmen, wäre die Messung mit dem Oszilloskop in seiner zeitlichen Auflösung unzureichend. Deshalb wurde eine Elektronik zur Gleichrichtung des Spannungspulses aufgebaut. Das gleichgerichtete Signal wird über einen Spannungs-Frequenz-Wandler (VCO) in den Meßcomputer eingespeist, der so die Stromwerte zusammen mit den Arbeitspunkten mit bis zu 50 Hz aufzeichnet und an den Prozeßrechner weitergibt. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt in der nicht-linearen Kennlinie der Gleichrichtung. Dadurch wird eine Berechnung des absoluten Stromes ungenau. Für die Messung der Zeitpunkte von Strahlverlusten ist das jedoch nicht von Bedeutung, und die zeitliche Auflösung von 20 ms ist völlig ausreichend.

5.3.4 Booster Chromatizitätsmessung

Wie in Kapitel 2.3.1 ausgeführt, läßt sich die Chromatizität aus der Arbeitspunktverschiebung durch eine Verschiebung der Beschleunigungsfrequenz

nach Gleichung 2.9 bestimmen. Die in Abbildung 5.7 dargestellte Elektronik zur Arbeitspunktmessung erfordert bei Verschiebung der Beschleunigungsfrequenz f_{HF} eine Anpassung der Frequenz f_{L2} des Local-Oszillators II, nach:

$$f_{L2} = f_{HF} \cdot \frac{h_{\text{measure}}}{h_{\text{booster}}} - f_{L1} - f_{zw},$$

wobei $h_{\text{booster}} = 84$ die Harmonischenzahl des Boosters, $h_{\text{measure}} = 87$ die Harmonische der Messung, $f_{L1} = 12 \text{ MHz}$ die Frequenz des ersten Local-Oszillators und $f_{zw} = 10,7 \text{ MHz}$ die Zwischenfrequenz der Messung ist.

Für eine Messung der Chromatizität wird die gesamte Arbeitspunktkurve während der Rampe bei verschiedenen Beschleunigungsfrequenzen aufgenommen. Aufgrund des kleinen *Momentum-compaction-factors* des Boosters muß dabei die Frequenz mindestens um $\pm 100 \text{ kHz}$ variiert werden, um mit Arbeitspunktverschiebungen um 30 kHz signifikante Ergebnisse zu erzielen.

Die Chromatizitätskurve für die gesamte Rampe läßt sich somit im Prinzip binnen zweier Zyklen messen. Zur Reduzierung der statistischen Fehler bietet sich jedoch an, jeweils Daten über mehrere Zyklen zu nehmen und auch Frequenzzwischenschritte zu machen, um die Chromatizität mittels linearer Regression für die einzelnen Zeitintervalle zu bestimmen.

5.3.5 Booster Optikmessung

Nach Gleichung 2.8 lassen sich die Betafunktionen eines Beschleunigers durch Messung der Arbeitspunktverschiebung bei Variation der Fokussierung bestimmen. Für den Booster läßt sich somit die mittlere Betafunktion einer Quadrupolfamilie durch die proportionale Änderung des Minimal- und Maximalstromes der Familie bestimmen. Die Messung erfolgt dann wieder mit der Zeitauflösung der Arbeitspunktdiagnose, d.h. mit 50 Hz .

Für eine Messung der Betafunktion in einem einzelnen Quadrupol muß in diesem die Quadrupolstärke variiert werden. Dies kann über das Parallelschalten eines Zusatznetzgerätes oder eines Widerstandes an dem Quadrupol geschehen. Wird das Zusatznetzgerät als ideale Stromquelle mit unendlichem Innenwiderstand betrieben, so läßt sich damit auch die Betafunktion während der Rampe messen. Praktisch muß man jedoch mit einer Koppelung der Regelkreise beider Netzgeräte rechnen, so daß im dynamischen Fall der

Shunt zu bevorzugen ist. Da dadurch jedoch auch die Zeitkonstante für das Netzgerät der Quadrupolfamilie beeinflußt wird und somit die Dynamik der Rampe, wurde auf dynamische Messungen an Einzelquadrupolen verzichtet. Für den statischen Fall wurde nachgewiesen, daß die Betafunktionen in den verschiedenen Quadranten gut übereinstimmen [Kamp96].

5.4 Aufgabenorientierte graphische Benutzeroberflächen

Alle graphischen Benutzeroberflächen wurden mit dem Tcl/Tk Toolkit erstellt. Der Tcl-Interpreter wurde dazu um die DELTA Kontrollsystem Call-Schnittstelle erweitert, die es ermöglicht, direkt auf die Geräte über den *Device-Attribut* Namen zuzugreifen. Außerdem wurden verschiedene Erweiterungen integriert, z.B. ein *wheelswitch-widget*, mit dem die Sollwerte in der Art eines Stellrädchens variiert werden können.

Für die Führung von „Anfängern“ und „diskontinuierlichen Nutzern“ bei der Bedienung der Benutzeroberflächen werden Menüleisten verwendet. Der Aufbau ist dabei für alle Oberflächen ähnlich. Es gibt folgende 5 Menüs:

File: Das Speichern, Laden und Drucken der Daten, sowie das Beenden des Programms wird von diesem Menü gesteuert.

Show: Mit diesem Menü wird die Anzeige der Daten konfiguriert.

Data: Die Funktionen zur Steuerung der Datennahme sind im Data Menü.

Actions: Hier werden besondere Aktionen ausgelöst, z.B. der Start unabhängiger Programme.

Help: Das entsprechende Menü enthält die Hilfefunktionen.

Bei allen Funktionen der graphischen Benutzeroberflächen wurde darauf geachtet, daß sie sowohl über die Tastatur, als auch mit der Maus bedient werden können. Die Menüs enthalten *Shortcuts* für die wichtigsten Funktionalitäten. Das sind Tastenkombinationen, die in den Menüs mit dargestellt werden und welche die selben Funktionen ausführen wie der entsprechende Menüeintrag. Für die verschiedenen Programme wurde darauf geachtet, daß

die Tastenkombinationen konsistent vergeben wurden. D.h. daß das Speichern der Daten z.B. grundsätzlich über die Tastenkombination „Control-s“ ausgelöst wird und daß, wenn das Programm die Funktion „Daten Speichern“ nicht kennt, die Tastenkombination „Control-s“ keiner sonstigen Funktion zugeordnet ist.

5.4.1 Ablaufsteuerung der Akkumulation

Die graphische Benutzeroberfläche `BodoTrigger.tcl` ermöglicht die Einstellung fünf verschiedener Zyklus-Modi. Neben den vier in Abschnitt 5.1.4 beschriebenen Modi (Stop, Linac, Bodo, Delta) wird ein Stromsparmodus „Store“ unterstützt. Das Programm stellt die entsprechenden Trigger-Sequenzen der Timing Elektronik ein, startet oder stoppt den Zyklus und fährt die Magnete auf einen spezifizierten Wert. Tabelle 5.1 zeigt, welche Zustände durch die graphische Benutzeroberfläche eingestellt werden. Die Einbindung der

Tabelle 5.1: Zyklus-Modi der graphische Benutzeroberfläche `BodoTrigger.tcl`

Zyklus-Modus	Zyklus	Trigger-Modus	Strom-Modus
Stop	stopped	Stop	Maximalströme
Linac	stopped	Linac	Minimalströme
Bodo	running	Bodo	Zyklus
Delta	running	Delta	Zyklus
Store	stopped	Stop	Minimalströme

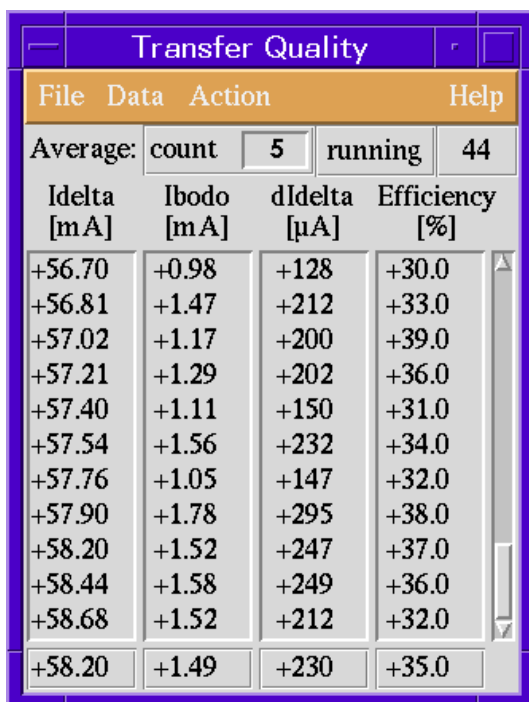
Steuerung in andere Programme ist in Form eines Submenüs vorgesehen. So kann z.B. für die Generierung von Rampen oder die Optimierung der Transmissionen von den entsprechenden Programmen direkt der benötigte Modus eingestellt werden.

Zur Einstellung der häufig genutzten Füllmuster wird das Programm `stdpattern.tcl` verwendet. Dieses zeigt für jeden Fülltyp einen Knopf an, dessen Betätigung auf die Akkumulation in entsprechendes Füllmuster wechselt. Als Standard-Füllmuster stehen zur Auswahl: „Single Bunch“ (entspricht den Werten $Patternlength = 0$, $Bucketstep = 0$), „2 Bunches“ (96, 96), „4 Bunches“ (144, 48), „2/3 Filling“ (128, 4) und „3/4 Filling“ (144, 4). Das Programm kann durch eine Konfigurationsdatei um neue Füllmuster erweitert werden. Alternativ kann die Füllstruktur auch durch direkte Variation

der beiden Füllparameter erfolgen, z.B. mittels der generischen graphischen Benutzeroberfläche `xclass.tcl`.

5.4.2 Darstellung der Gütemaße

Zur Optimierung der Elektronenakkumulation im Speicherring Delta gilt es, die Gütefunktion nach Abschnitt 4.2.2 zu maximieren. Die Messung der Strahlströme wurde in Abschnitt 5.3.3 erläutert. Zur Berechnung und Darstellung der Effizienz des Transferkanals T2 und der Güte der Akkumulation im Speicherring wird das Programm `effi.tcl` verwendet. Abbildung 5.9 zeigt die Benutzeroberfläche des Programms. Maximal eine Sekunde nach der Ejektion aus Bodo wird die Effizienz des Transfers vom Booster in den Speicherring und der daraus folgende Strahlstromzuwachs im Speicherring angezeigt, so daß eine Optimierung von Zyklus zu Zyklus erfolgen kann. Das



Idelta [mA]	Ibodo [mA]	dIdelta [uA]	Efficiency [%]
+56.70	+0.98	+128	+30.0
+56.81	+1.47	+212	+33.0
+57.02	+1.17	+200	+39.0
+57.21	+1.29	+202	+36.0
+57.40	+1.11	+150	+31.0
+57.54	+1.56	+232	+34.0
+57.76	+1.05	+147	+32.0
+57.90	+1.78	+295	+38.0
+58.20	+1.52	+247	+37.0
+58.44	+1.58	+249	+36.0
+58.68	+1.52	+212	+32.0
+58.20	+1.49	+230	+35.0

Abbildung 5.9: Graphische Benutzeroberfläche des Programms `effi.tcl` zur Darstellung der Gütemaße. Am Ende der jeweiligen Spalten werden die aktuellen Werte angehängt, sobald eine Ejektion stattgefunden hat. Das Programm zeigt die Spalten-Mittelwerte in der untersten Zeile an. Man kann zwischen verschiedenen Mittelungsarten wählen.

File-Menü beinhaltet die Standardfunktionen wie Speichern und Wiederherstellen der Setups. Das *Data*-Menü ermöglicht die Konfiguration der Datennahme und der Mittelwertbildung. Für die Akkumulation hoher Peakströme

im Speicherring kann die Effizienz der Injektion effektiv von den Instabilitäten des gespeicherten Strahls entkoppelt werden, indem man den Teilchentransfer vom Booster in den Speicherring zunächst bei kleinen Strahlströmen im Speicherring optimiert. Zu diesem Zweck unterstützt das Programm die Auslösung einer automatischen, gezielten Strahlvernichtung im Speicherring, wahlweise periodisch oder bei Überschreiten einer einstellbaren Stromschwelle. Die Mittelwertbildung kann speziell für diesen Modus die mittleren Raten seit dem letzten Strahlvernichtung bilden.

Da die Überwachung der Tranfergüte eng mit ihrer Optimierung verknüpft ist, können über das *Action*-Menü alle wesentlichen Tools zur Steuerung des Transfers aufgerufen werden. Ein Untermenü ermöglicht die Steuerung des Boosterzyklus-Modus analog zu der Anwendung **BodoTrigger** (siehe Abschnitt 5.4.1).

Die Daten zur Messung der Güten für die Gun, den Linac und den Transferkanal T1 werden, wie oben erwähnt, von der Echtzeit-Applikation **CallAfterInj** mitgeschrieben. Auf eine graphische Weiterverarbeitung der Daten wurde jedoch vorerst verzichtet, da der komplette Linearbeschleuniger inklusive des Senders in Kürze umgebaut wird [Will99]. Der neue Aufbau wird nur noch eine Haupt-Beschleunigungsstruktur – bei gleicher Endenergie – enthalten, und unterscheidet sich auch beim Transferkanal T1 von dem aktuellen.

5.4.3 Darstellung des Orbits

Zur Visualisierung des Booster Orbits wurde das Programm **orbit.tcl** entwickelt. Es ermöglicht die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der transversalen Orbitdaten an allen 14 Strahllagemonitoren. Abbildung 5.10 zeigt das Hauptfenster des Programms. Neben Speichern, Laden und Ausdrucken der Orbitdaten wurde vor allem Wert gelegt auf Funktionen zur einfachen Konfiguration der Daten-Darstellung. So können die darzustellenden horizontalen-, vertikalen- und Zeit-Bereiche nicht nur als Zahlenwerte vorgegeben werden, sondern auch über eine Zoom-Funktion direkt mit der Maus durch Aufziehen eines Kästchens um den darzustellenden Datenbereich. Um einen schnellen ersten Eindruck über die Orbitdaten zu vermitteln, kann man die Daten eines Monitors hervorheben, indem man den Mauszeiger in der Monitorliste über den entsprechenden Namen stellt (siehe Abb. 5.11). Die Orbitdaten können

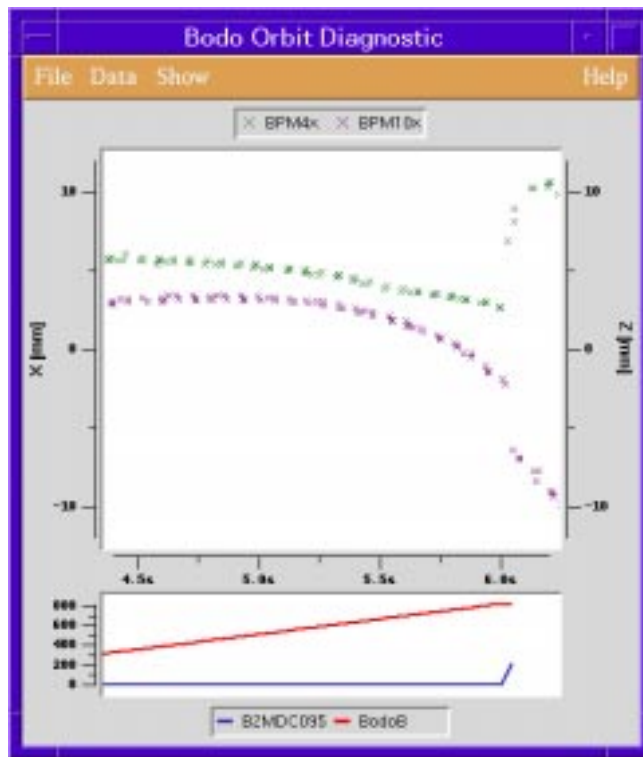


Abbildung 5.10: Hauptfenster des Programmes `orbit.tcl`. Im oberen Teil sind die Orbit-Daten für die horizontale Ablage an zwei im Ring gegenüberliegenden Monitoren dargestellt. Im unteren Teil sind die Stromkurven für das Dipolnetzgerät und die Ejektionsbeule dargestellt.

über das *Show*-Menü zusammen mit den drei Rampen-Grundformen (Dipol-Rampe, Ejektionsbeule und HF-Rampe) dargestellt werden (siehe Abb. 5.10). Die In- und Ejektionszeitpunkte können durch senkrechte Linien markiert werden. Das Programm kann ebenfalls den zeitlichen Verlauf des gemessenen Strahlstroms und der Hochfrequenzleistung darstellen.

Die Datennahme kann über mehrer Zyklen erfolgen, um die Meßwertdichte zu erhöhen. Für eine einfache Zuordnung der Daten zu den Zyklen kann man die Daten für einen Monitor nach Zyklen sortiert durch Linien verbinden lassen.

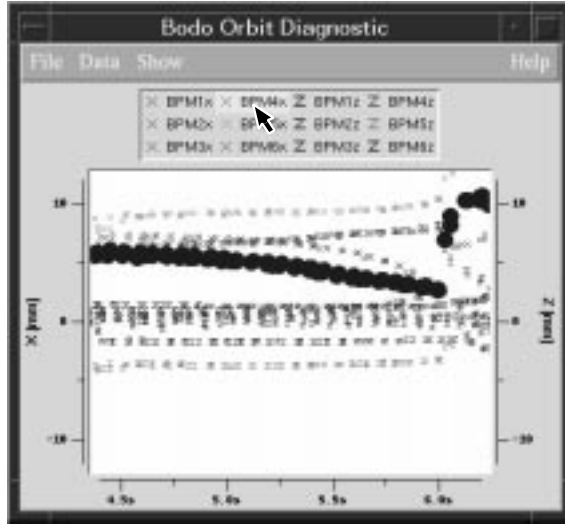


Abbildung 5.11: Die Liste der dargestellten Strahlmonitore kann zur schnellen Hervorhebung der Orbitdaten eines Monitors genutzt werden, indem man mit dem Mauszeiger auf den gewünschten Monitor zeigt.

5.4.4 Darstellung der Arbeitspunkte

Das Programm `ramplab.tcl` ermöglicht die Darstellung des Arbeitspunktverlaufes auf der Rampe. Darüber hinaus stellt es Funktionen zur Generierung von arbeitspunktstabilisierten Rampen zur Verfügung. Die Funktionen der *File*- und *Show*-Menüs sind identisch zum Programm `orbit.tcl`. Das *Data*-Menü liefert zusätzlich die Möglichkeit, die Arbeitspunkt-Daten zu filtern, z.B. durch die Einstellung eines minimalen Strahlstroms oder einer minimalen spektralen Peakhöhe. Dadurch lassen sich die Daten von Rauschpeaks befreien. Dieser Punkt ist besonders wichtig für die automatisierte Weiterverarbeitung der Daten, z.B. für die Optikmessung mit dem Programm `bodooptic` oder der Bestimmung der Chromatizität des Boosters mit `bodochroma`. Bei diesen Auswertungen wird eine lineare Regression der Daten nach der Methode der kleinsten Abstandsquadrate durchgeführt, welche sehr empfindlich gegenüber Ausreißern in den Daten ist. Das *Action*-Menü stellt verschiedene Funktionen zur Arbeitspunktstabilisierung der Rampe zur Verfügung. Es ermöglicht die Bearbeitung eines Rampensetups und die Initialisierung einer Rampe. Für die automatisierte Arbeitspunktkorrektur kann man die Korrekturmatrix \underline{M} bestimmen lassen. Diese definiert die Kopplung zwischen den Stromkorrekturen $\kappa_i \equiv \frac{\Delta I}{I}$ für die Familiengruppen $i \in \{QF, QD\}$ und den Arbeitspunktverschiebungen ΔQ_y mit



Abbildung 5.12: Hauptfenster des Programms `ramplab.tcl`. Das zuletzt geladene Rampensetup wird permanent angezeigt. Für die Darstellung des Arbeitspunktverlaufes wird ein eigenes Fenster geöffnet (siehe z.B. Abb. 6.1).

$y \in \{x, z\}$ nach:

$$\begin{pmatrix} \Delta Q_x \\ \Delta Q_z \end{pmatrix} = \underline{M} \begin{pmatrix} \kappa_{QF} \\ \kappa_{QD} \end{pmatrix}$$

Für die Bestimmung werden nacheinander die fokussierenden (QF) und defokussierenden (QD) Quadrupole um 1% Verfahren und die zugehörigen Arbeitspunktverläufe aufgenommen. Die Funktion zur Arbeitspunktkorrektur erweitert die Stützstellenliste $\{t_i, \kappa_{QF}(t_i), \kappa_{QD}(t_i)\}$ der aktuellen Rampe auf Zeitabstände $(t_{i+1} - t_i) \leq 100 \text{ ms}$ und korrigiert die einzelnen Stützstellen nach

$$\begin{pmatrix} \kappa_{QF}(t_i) \\ \kappa_{QD}(t_i) \end{pmatrix} = \underline{M}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta Q_x(t_i) \\ \Delta Q_z(t_i) \end{pmatrix}$$

Abbildung 5.12 stellt das Hauptfenster der Oberfläche dar. Für die Darstellung der Arbeitspunktverläufe sei hier nur auf Kapitel 6 verwiesen. Um die Arbeitspunktverläufe verschiedener Rampen vergleichen zu können, kann man sie entweder in einem Fenster gemeinsam darstellen, oder weitere Fenster über einen Menüpunkt im *Data*-Menü öffnen.

5.4.5 Anzeige des Maschinenzustandes

Das Programm `state.tcl` dient der Darstellung des aktuellen Maschinenzustandes der Beschleuniger von DELTA. Durch sie läßt sich überprüfen, ob sich die Anlage in einem konsistenten Zustand befindet und wie dieser Zustand eingenommen wurde. Dazu werden die *State*-Variablen mit ihren aktuellen Werten angezeigt, d.h. der aktuelle abstrahierte Zustand der Maschine. Für

State of DELTA			
File	Show	Actions	Help
State-Variable	State-Value		
Linac_Energy	35MeV		
T1_Energy	35MeV		
BoDo_Inj_Energy	35MeV		
BoDo_Ej_Energy	1300MeV		
T2_Energy	1300MeV		
Delta_Energy	1300MeV		
Delta_Energy_Steerer	1300MeV		
Linac_Optic	V001		
T1_Optic	V001		
BoDo_Optic	V005		
T2_Optic	V005		
Delta_Optic	V006		

Abbildung 5.13: Das Programm `state.tcl` dient zur Visualisierung des aktuellen Maschinenzustandes.

den Fall, daß die Maschine in einen neuen Zustand versetzt wurde – z.B. eine neue Energie des Linearbeschleunigers – lassen sich die Werte der *State*-Variablen über die Oberfläche modifizieren. Das *Show*-Menü ermöglicht die Anzeige der für jede Gerätegruppe zuletzt geladenen Setup-Files. Dadurch läßt sich feststellen, wie die Anlage in den aktuellen Zustand versetzt wurde. Ein weiterer Menüpunkt ermöglicht die Anzeige der zuletzt gespeicherten Setup-Files für die einzelnen Gerätegruppen. Das ermöglicht einen Überblick, wann zuletzt der Maschinenzustand gesichert wurde und wie dieser sich, zum Beispiel nach einer Fehlbedienung, wiederherstellen läßt. Über das *Action*-Menü kann der *Setup-Browser* aufgerufen werden.

5.4.6 Setup-Browser

Das Programm `setupbrowser.tcl` ist die graphische Benutzeroberfläche zur gezielten Wiederherstellung von Maschinenzuständen. (siehe Abb. 5.14). Es ermöglicht die Selektion von Setups nach verschiedene Filter-Kriterien:

Namens-Mustern: Wie in Abschnitt 5.1.3 ausgeführt wurde, werden die Namen der Setups systematisch generiert. Durch die Auswahl geeigneter Namens-Muster³ lassen sich somit Setups für eine bestimmte Gerä-

³Die Definition der Muster folgt dem „glob“-Style von Tcl, wie er auch unter Unix oder MsDos benutzt wird.

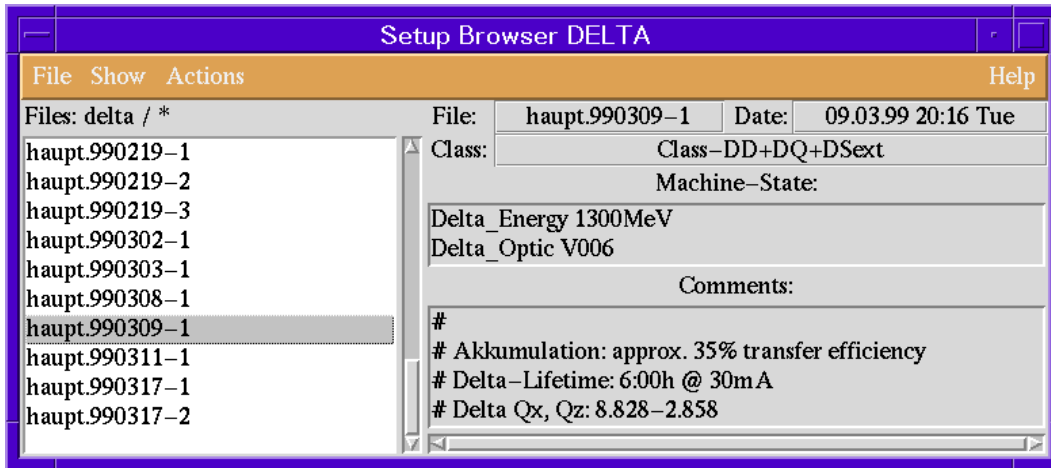


Abbildung 5.14: Das Programm `setupbrowser.tcl` zur graphischen Handhabung der Setups.

tegruppe oder zu einem bestimmten Datum auswählen. Z.B. liefert das Muster `*99030[1-5]*` alle Setups der Schichtwoche vom 1.3.-4.3.99.

State-Variablen: Über die Auswahl eines *State*-Wertes für eine *State*-Variable können Setups zu einem bestimmten abstrahiertem Maschinenzustand ausgewählt werden. Z.B. wählt die Selektion `Linac_Energy 75MeV` alle Setups für den Linearbeschleuniger aus, die den Betrieb bei dieser Energie ermöglichen.

Die Setups sind in einem Verzeichnisbaum geordnet, der die Betriebszustände der Maschine grob widerspiegelt. Während der Inbetriebnahmephase bei einer Optik und fester Energie reichte das alleine bereits zur Gliederung der Setups aus. Im *File*-Menü des Programms `setupbrowser.tcl` wurde deswegen eine Funktion zur gezielten Durchsuchung des Verzeichnisbaumes nach Setups, welche die Filter-Kriterien erfüllen, integriert. Neben dem Laden eines Setups ist auch eine *View*-Funktion implementiert, welche das selektierte Setup mit den aktuellen Sollwerten der Maschinengruppe vergleichend darstellt und signifikante Abweichungen farblich markiert. Die Signifikanz wird dabei für jedes Gerät durch seinen individuellen Tolleranz-Wert festgelegt, wie er über die Darstellungsdaten nach Abschnitt 4.4.4 vorgegeben wird.

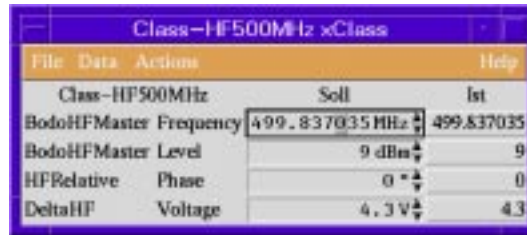


Abbildung 5.15: Das Programm `xclass.tcl` zur generische Gerätegruppensteuerung

Die Handhabung von Setups ist neben dem Zugriff durch die graphische Benutzeroberfläche auch durch Kommandozeilenaufrufe möglich. Für das direkte Sichern und Wiederherstellen von Setups dienen die Programme `savesetup` und `loadsetup`. Zusätzlich ermöglicht das Programm `SaveStdSetup` das Sichern unter automatisch generierten, systematischen Filenamen.

5.4.7 Generische Gerätegruppensteuerung

Das Programm `xclass.tcl` dient der Steuerung von Gerätegruppen (siehe Abb. 5.15). Das *File*-Menü läßt Speichern, Laden und Anzeigen von Setups analog zu den Funktionen des Programms `setupbrowser.tcl` zu. Über das *Data*-Menü kann man eine einmalige oder periodische Aktualisierung der Soll- und Ist-Werte der dargestellten Geräte veranlassen. Das *Action*-Menü erlaubt das Ein- und Ausschalten der gesamten Gerätegruppe, wobei nur die Geräte geschaltet werden, die diese Funktion auch besitzen. Neben der individuellen Einstellung der Einzelgeräte kann auch die gesamte Gerätegruppe mit einem Faktor multipliziert werden. Dazu kann über das *Action*-Menü zwischen *Multi*-Modus und *Scale*-Modus gewechselt werden. Während im *Multi*-Modus für jedes Gerät ein *wheelswitch-widget* dargestellt wird, wird im *Scale*-Modus nur ein *wheelswitch-widget* zur Variation der ganzen Gruppe verwendet.

Für die Darstellung der Soll- und Istwerte werden die Visualisierungsdaten nach Abschnitt 4.4.4 verwendet. Eine Tcl-Funktion liest die Daten aus einem File. Die Zeilen des Files sind von der Form:

{ <Device-Expression> <Attribut-Expression> <Minimum> <Maximum>
<Schrittweite> <Toleranz> <Istwert-Format> <Sollwert-Format> <Ein-
heit> }

Die *Device*- und *Attribut*-Namen werden als *regular-expressions* [HP87] angegeben. Durch Benutzung dieses unter UNIX gebräuchlichen Textmuster-Vergleichs läßt sich der Umfang der Visualisierungsdaten erheblich reduzieren. Da Gerätekanäle vom gleichen Typ auch meist ähnliche Namenskonstruktionen haben, kann so für eine ganze Gerätegruppe, wie z.B. den Korrekturspulen des Speicherrings, die Visualisierung über eine einzige Zeile konfiguriert werden. Insgesamt werden zur Zeit 33 Gerätetypen unterschieden.

Kapitel 6

Analyse eines Boosterzyklus

Im Folgenden wird exemplarisch die Vermessung einer Booster-Energierampe dargestellt. Es wurde eine $6,4\text{ s}$ Rampe der Bodo V005 Optik untersucht. Die Injektionsenergie dieser Rampe liegt bei 35 MeV , die Ejektionsenergie bei 1300 MeV . Die Erstellung einer Rampe mit halber Injektionsenergie wurde notwendig, um den Strahlbetrieb nach Ausfall eines 3 GHz Klystrons des Linearbeschleunigers aufrechtzuerhalten.

Anhand der Messungen an dieser Rampe wird die praktische Durchführung der einzelnen Meßverfahren vorgestellt sowie die Erfahrungen, die mit dem Einsatz der entwickelten Steuerungs- und Diagnosewerkzeuge gesammelt wurden.

6.1 Rampenerstellung

In einem ersten Schritt wurde die Rampe aus einer mit 75 MeV Injektions- und 1300 MeV Ejektionsenergie skaliert. Dann wurde getestet, ob alle Netzgeräte in der Lage sind, ihren Sollwertkurven zu folgen. Nachdem das positiv bestätigt wurde begannen die Tests mit dem Strahl. Zuerst wurden empirisch Dipol- und Quadrupolströme variiert, um die Anzahl der Umläufe zu optimieren. Sobald der Strahl für etwa 50 ms in der Maschine gehalten werden konnte, begann die gezielte Arbeitspunktkorrektur. In Schritten von $50\text{--}200\text{ ms}$ wurde der Arbeitspunkt sukzessive bis zur Extraktion optimiert. Dabei fanden die Korrekturen im wesentlichen an den Zeitpunkten von Strahlverlusten statt. Die Abbildung 6.1 zeigt drei Schritte aus der Arbeitspunktkorrektur der Rampe.

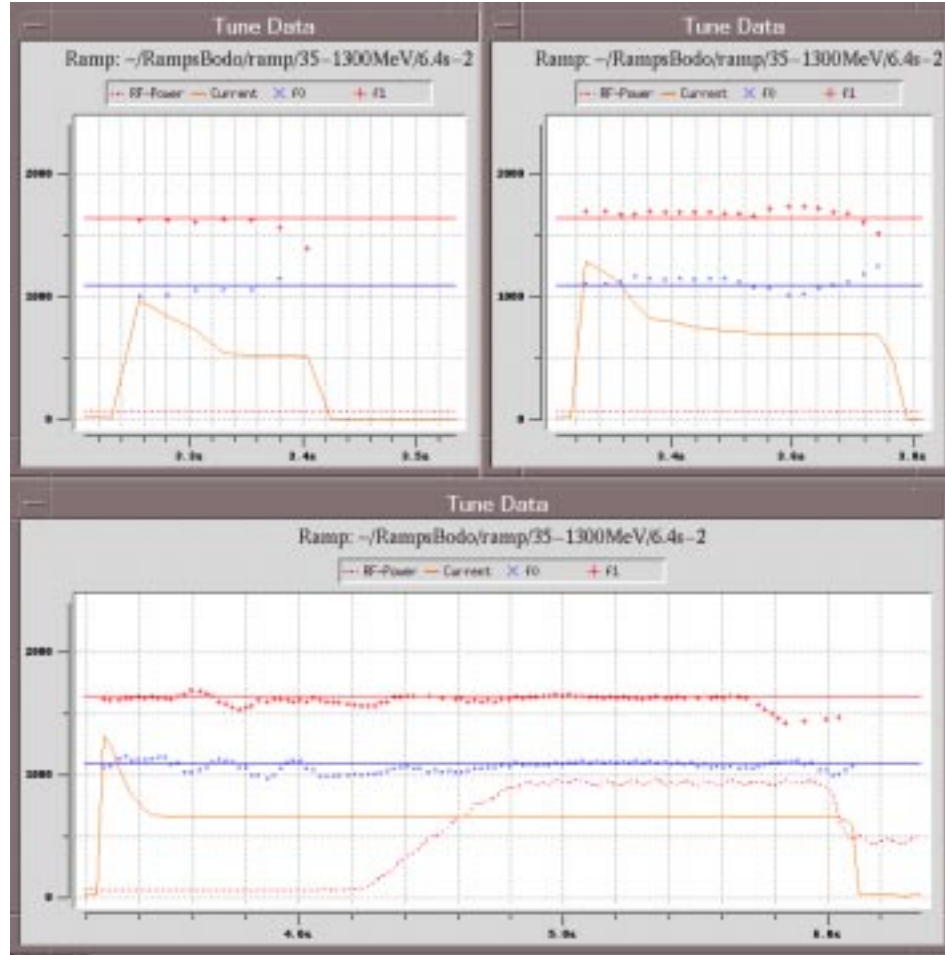


Abbildung 6.1: Drei Schritte aus der Arbeitspunktkorrektur einer 6.4 s Rampe. Oben links ist die Rampe nach den ersten systematischen Korrekturen 150 ms nach der Injektion dargestellt. Oben rechts ist die in der ersten halben Sekunde korrigierte Rampe zu sehen. Unten ist die Rampe abgebildet, bei der erfolgreich extrahiert wurde. Die Injektion erfolgt zum Zeitpunkt $t_{inj} = 3.15\text{ s}$ nach Rampenstart, die Ejektion zum Zeitpunkt $t_{ej} = 6.08\text{ s}$.

6.2 Messung der Optik

Zur Bestimmung der Betafunktionen wird jede Quadrupolfamilie in 5%-Schritten in beide Richtungen um ihren Sollwert verfahren. Dazu wird im

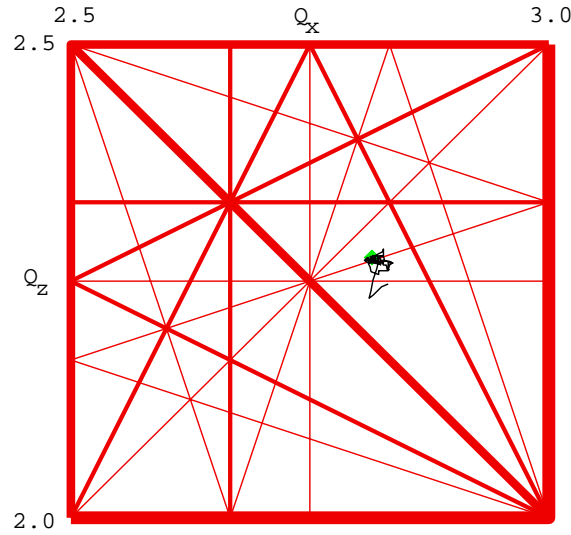


Abbildung 6.2: Bewegung des Arbeitspunktes in der Q_x - Q_z Ebene. Der Soll-Arbeitspunkt liegt auf einer Resonanzlinie vierter Ordnung, welche allerdings keinen Meßbaren Einfluß auf die Strahllebensdauer hat. Die einzige signifikante Abweichung vom Sollarbeitspunkt liegt kurz vor der Extraktion vor (siehe auch Abb. 6.1 Bild c))

Rampen-Setupfile jeweils der Minimal- und Maximalwert entsprechend skaliert. Anschließend muß die so erstellte Rampe initialisiert werden. Zu jeder Rampe werden, nach einigen Zyklen zur Massage der Magnete, die Arbeitspunktverläufe für mehrere Zyklen aufgezeichnet. Bei größeren Quadrupol-Skalierungen muß eventuell die Injektion angepaßt werden, um einen ausreichenden Strahlstrom injizieren zu können.

Zur Auswertung der Daten verwendet man das Programm `bodooptic`. Es teilt die Daten in Zeitintervalle ein (hier je 50 ms) und berechnet für jedes Intervall und jede Ebene die mittlere Betafunktion $\bar{\beta}$ der Quadrupolfamilie über eine lineare Regression. Die Änderung der Fokussierstärke einer Quadrupolfamilie führt nach Gleichung 2.8 zu einer Verschiebung der Betatronfrequenz:

$$f_{\beta y} = \Delta k \frac{l \cdot f_u}{4\pi} \bar{\beta}_y + f_{\beta y 0}.$$

Dabei ist Δk die Fokussierstärkenänderung und $f_{\beta y}$ die Betatronfrequenz in der x- oder z-Ebene. Die Regression erfolgt somit über die Wertepaare

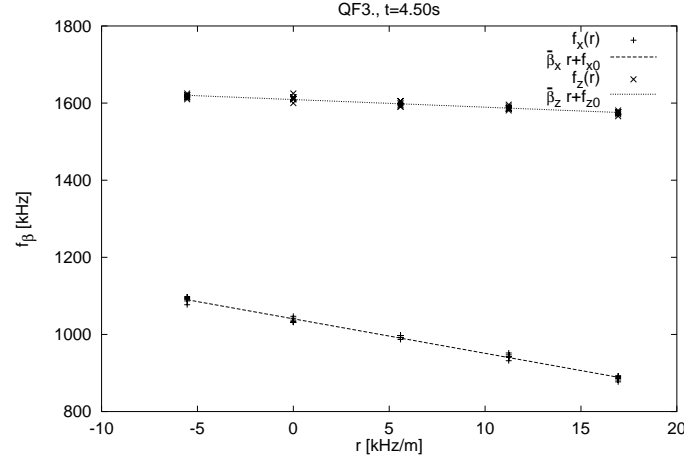


Abbildung 6.3: Daten und Regressionsgerade der QF3-Familie für ein Intervall.

$\{r; f_{\beta y}\}$, wobei

$$r \equiv \left(\frac{1}{n} \Delta k \frac{l \cdot f_u}{4\pi} \right).$$

Hier fließt noch die Familiengröße n ein mit $n = 4$ für die Familien QF1, QF2, QF3 und QD1 sowie $n = 8$ für die Familie QD. Zur praktischen Messung benutzt man die Näherung $\Delta k = \frac{\Delta I}{I} k$ und führt die Fokussierstärke k zurück auf den Quadrupolstrom I_Q nach

$$k = \frac{I_Q}{E} 8,648 \left[\frac{GeV}{m^2 A} \right] \quad [\text{Kamp96}].$$

Die Energie E berechnet man aus dem Dipolstrom I_D mit

$$E = 1,598 \left[\frac{MeV}{A} \right] \cdot I_D \quad [\text{Kamp96}].$$

Abbildung 6.3 zeigt die Daten und die Regressionsgerade für ein Intervall (4.00-4.05 s bezogen auf den Rampenstart) der QF3-Familie.

Die aus den Regressionen gewonnenen mittleren Betafunktionen $\bar{\beta}$ für die einzelnen Intervalle werden von dem Programm `bodoptic` anschließend in einer Graphik zusammengefaßt. Diese Graphiken sind in den Abbildungen 6.4, 6.5 und 6.6 für die fünf Quadrupolfamilien dargestellt.

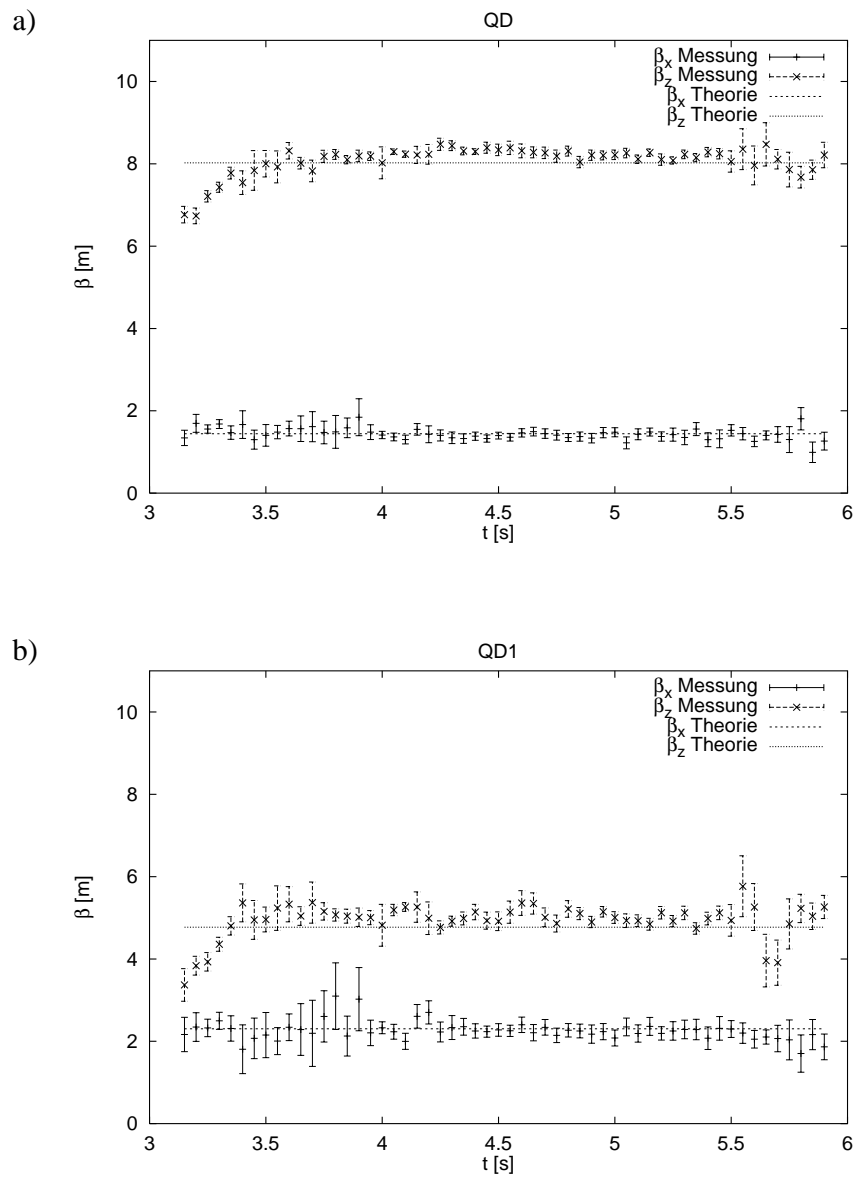


Abbildung 6.4: Zeitliche Entwicklung der Betafunktionen der beiden defokussierenden Quadrupolfamilie verglichen mit den aus den eingestellten Strömen mittels MAD simulierten Theoriewerten.

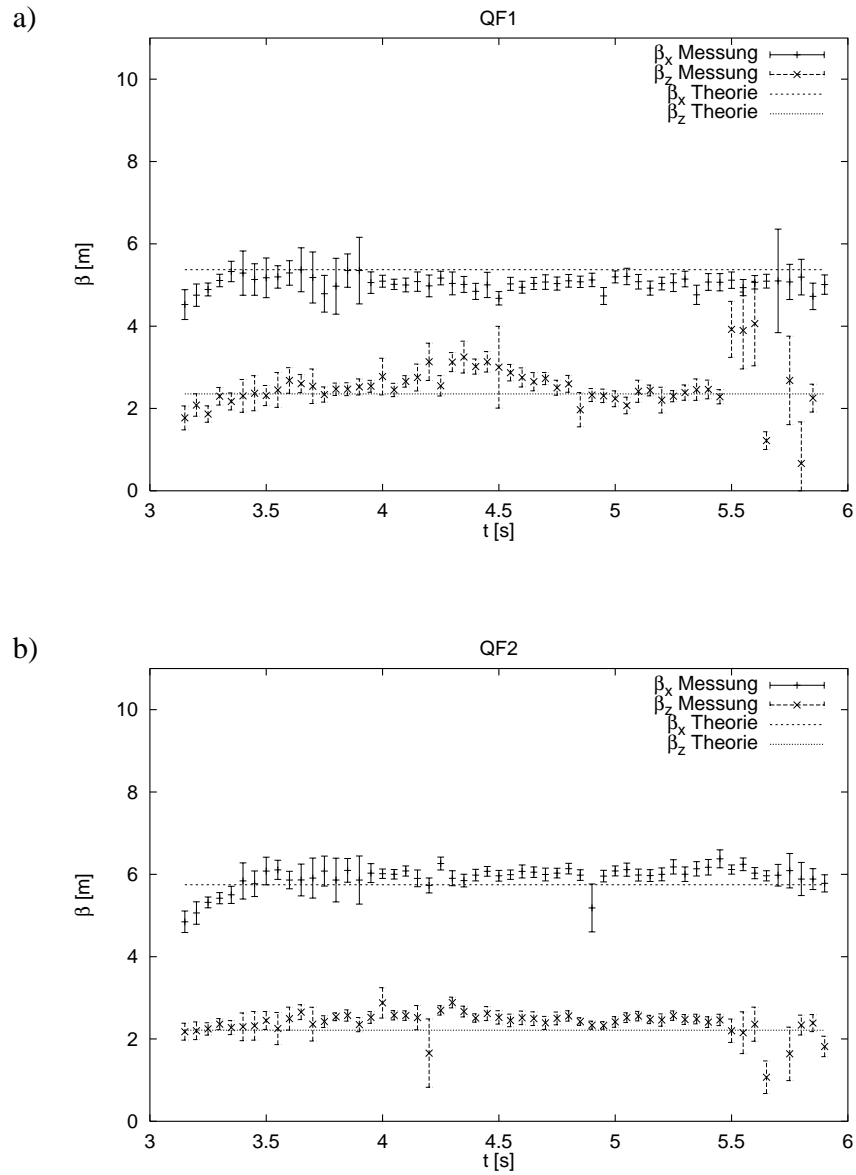


Abbildung 6.5: Zeitliche Entwicklung der Betafunktionen der fokussierenden Quadrupolfamilien a) QF1 und b) QF2 verglichen mit den aus den eingestellten Strömen mittels MAD simulierten Theoriewerten.

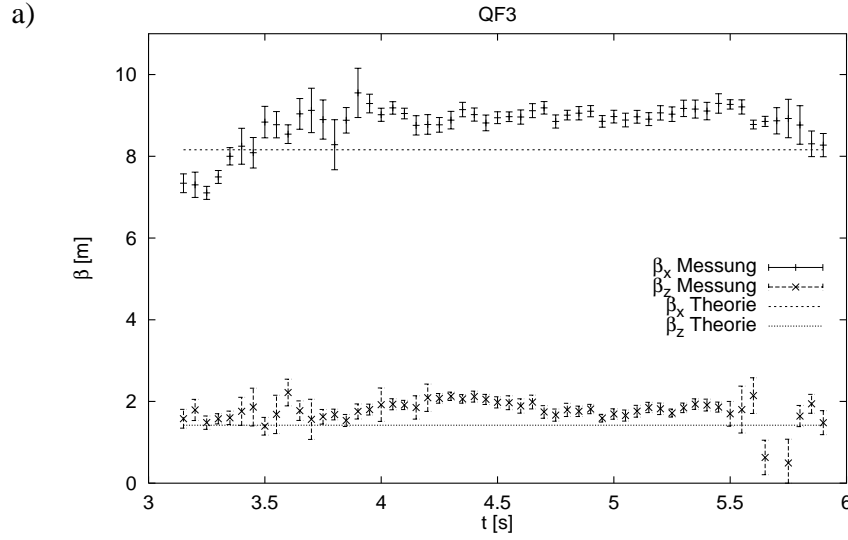


Abbildung 6.6: Zeitliche Entwicklung der Betafunktionen der fokussierenden Quadrupolfamilie QF3 verglichen mit den aus den eingestellten Strömen mittels MAD simulierten Theoriewerten.

6.3 Messung der Chromatizität

Zur Messung der zeitlichen Entwicklung der Chromatizität des Boosters auf der Rampe wird die Hochfrequenz in 8 Schritten um insgesamt 200 kHz verfahren. Diese große Verschiebung ist aufgrund des kleinen *Momentum-compaction-factors* nötig. Gleichung 2.9 liefert eine Abschätzung der zu erwartenden Betatronfrequenzverschiebung, wenn man den aus Simulationen gewonnen Theoriewert der Chromatizität von -3 für beide Ebenen ansetzt:

$$\Delta f_\beta = -\frac{Q'\Delta f_{HF}}{\alpha h} \cong \frac{600\text{ kHz}}{9.75} \cong 60\text{ kHz}$$

Bei einer Auflösung von 5 kHz der Arbeitspunktmessung sollte sich so die Chromatizität hinreichend genau bestimmen lassen. Die Frequenzspanne von 200 kHz ist als obere Grenze durch das Cavity gegeben, welches sich bei größeren Frequenzverschiebungen über die Steuerung nicht mehr auf Resonanz einstellen lässt. Während für den unteren Teil der Energierampe auch mit einem verstimmten Cavity gemessen werden kann, so ginge der Strahl bei

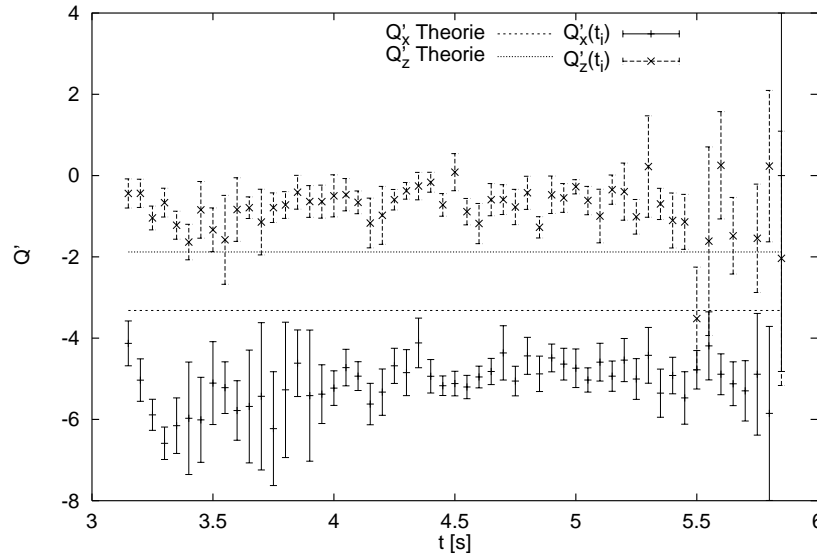


Abbildung 6.7: Dynamische Messung der Chromatizität. Die mittlere horizontale Chromatizität liegt bei $Q'_x = -5.02 \pm 0.06$, die mittlere vertikale Chromatizität bei $Q'_z = -0.65 \pm 0.05$. In beiden Ebenen weicht damit die Chromatizität signifikant von den als durchgezogenen Linien dargestellten theoretischen Werten ab.

größeren Energien aus Mangel an Hochfrequenzleistung verloren. Auch bei der gewählten Frequenzverschiebung konnte sich das Cavity im Meßzeitraum nicht auf Resonanz einregeln, was zu größeren Fehlern der Meßwerte ab ca. 5,5 s nach Rampenstart führte, da der Strahlstrom ab diesem Zeitpunkt bei Frequenzverschiebungen von mehr als $\pm 50 \text{ kHz}$ stark abnahm.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept für die effiziente Steuerung des Booster-Synchrotrons Bodo entworfen und umgesetzt. Die entwickelten Werkzeuge zur Steuerung und Diagnose des Boosters sind bereits unentbehrliche Hilfsmittel für den täglichen Betrieb des Beschleunigers.

Es wurde mit geringem finanziellem Aufwand ein weitreichendes Diagnosesystem geschaffen, welches in der Lage ist, die dynamischen Zustände des Booster-Synchrotrons zu erfassen und zu bewerten. Durch die Zielsetzung von DELTA als Testfeld der Beschleunigerphysik ergeben sich eine Fülle verschiedener Betriebszustände der Anlage. Für den Booster und den Akkumulationsprozeß wurde ein sorgfältiges Konzept entworfen und implementiert, welches eine einfache Gliederung und Handhabung dieser Zustände erlaubt.

Gerade für die Dortmunder Elektronen-Testspeicherringanlage, die an einer Universität, mit minimaler personeller Besetzung und – bedingt durch den Ausbildungscharakter der Anlage – mit häufig wechselndem Personal betrieben werden muß, ist eine hohe Effizienz der Steuerung unverzichtbar. Die entwickelten graphischen Benutzeroberflächen zeichnen sich durch eine kompakte Darstellung, einfache Handhabung und hohe Leistungsfähigkeit aus. Dadurch kann vor allem der Service-Betrieb des Boosters für die Teilchenakkumulation im Speicherring, z.B. für Synchrotronstrahlungsexperimente, bereits nach kurzer Einarbeitungszeit auch von studentischen Hilfskräften durchgeführt werden. Aber auch die Charakterisierung des Boosters, wie sie für seine Nutzung als Testfeld der beschleunigerphysikalischen Forschung wichtig ist, wird durch die entwickelten Werkzeuge umfassend bereitgestellt.

Die entwickelte Steuerung und Diagnostik bildet so den Grundstein für die angestrebte beschleunigerphysikalische Forschung am Booster, wie zum Beispiel Experimente zur Hochstromakkumulation im Niederenergiebereich oder die Verwendung von Bodo als Prototyp für eine kompakte Synchrotronstrahlungsquelle.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiel: <i>State-transition-diagram</i> und <i>State-notation-language</i> eines Netzgerätes	9
1.2	Das Standard-Modell der Anlagensteuerung	15
2.1	Das Orbit-Koordinatensystem	24
2.2	Arbeitspunktdiagramm mit den Resonanzen bis zur 4. Ordnung	27
2.3	Die Isosignallinien für die vier Pickups der DELTA-Strahllagemonitore	31
3.1	Die Dortmunder Elektronen-Testspeicherringanlage DELTA .	42
3.2	Vereinfachtes Schaltbild der Choppernetzgeräte	49
3.3	Client-/Server-Struktur des DELTA Kontrollsystems	52
3.4	Die Software-Ebenen des DELTA Kontrollsystems	53
5.1	Definition der Rampenform	68
5.2	Funktionsschema der Timing-Elektronik	71
5.3	Messung der Hochfrequenzleistung	73
5.4	Quadratischer Detektor für die Hochfrequenz-Leistungsmessung	73
5.5	Funktionsschema der Strahllage-Ausleseelektronik	75
5.6	Orbitmessung an Monitor BPM11 vor und nach Modifikation des Ausgangs-Tiefpasses	77

5.7	Analoge Elektronik zur dynamischen Arbeitspunktmessung am Booster	79
5.8	Schema des Meßaufbaus zur dynamischen Arbeitspunktbestimmung am Booster	80
5.9	Graphische Benutzeroberfläche des Programms <code>effi.tcl</code>	85
5.10	Hauptfenster des Programmes <code>orbit.tcl</code>	87
5.11	Schnelle Hervorhebung der Orbitdaten eines Monitors mit <code>orbit.tcl</code>	88
5.12	Hauptfenster des Programms <code>ramplab.tcl</code>	89
5.13	Das Programm <code>state.tcl</code> zur Visualisierung des Maschinenzustandes	90
5.14	Das Programm <code>setupbrowser.tcl</code> zur graphischen Handhabung der Setups	91
5.15	Das Programm <code>xclass.tcl</code> zur generische Gerätegruppensteuerung	92
6.1	Drei Schritte aus der Arbeitspunktkorrektur einer 6.4 s Rampe	96
6.2	Bewegung des Arbeitspunktes in der Q_x - Q_z Ebene	97
6.3	Daten und Regressionsgerade der QF3-Familie für ein Intervall	98
6.4	Zeitliche Entwicklung der Betafunktionen der defokussierenden Quadrupolfamilien	99
6.5	Zeitliche Entwicklung der Betafunktionen der fokussierenden Quadrupolfamilien QF1 und QF2	100
6.6	Zeitliche Entwicklung der Betafunktionen der fokussierenden Quadrupolfamilie QF3	101
6.7	Dynamische Messung der Chromatizität	102

Literaturverzeichnis

- [Abel90] Olaf Abeln, *Die CA.-Techniken in der industriellen Praxis*, Carl Hanser Verlag München **1990**
- [Bell85] J.S.Bell, *Hamilton Mechanics*, CAS Proceedings **1985** Vol. 1
- [Berg99] *The Parametric Current Transformer Specifications*, Bergoz **1999**, als http://www.bergoz.com/s_pct.htm
- [Bier93a] C. Biermann, N. Koch, *Ein Führungsgrößengenerator für das DELTA-Kontrollsystem*, DELTA Internal Report 93-003, DELTA, Universität Dortmund **1993**
- [Bier93b] C. Biermann, *Konzept eines offenen Kontrollsystems für Beschleunigeranlagen*, Dissertation, Universität Dortmund **1993**
- [Both90] W. Bothe, *Resonant Excitation of Synchrotron Magnets*, CERN Accelerator School, Montreux **1990**
- [Brin91] S. Brinker, R. Heisterhagen, K. Wille, *DELTA Beam Position Monitor*, IEEE Particle Accelerator Conference Vol. 2, San Francisco, USA **1991**
- [Brin93] F. Brinker, *The DELTA Storage Ring and Booster Magnets*, DELTA Internal Report 93-05, Universität Dortmund **1993**
- [Chun93] Y. Chung, G. Decker, K. Evans Jr., *Measurement of Beta-Function and Phase Using the Response Matrix*, PAC Proceedings **1993**
- [Delt90] DELTA Group, *DELTA a Status Report*, DELTA, Universität Dortmund **1990**
- [Diet96] J. Dietrich, J. Bojowald, I. Mohos und R. Wagner, *Transverse Measurements with Kicker Excitation at COSY-Jülich*, Forschungszentrum Jülich GmbH (KFA), Jülich, Germany **1996**
- [Dunk96] K. Dunkel, *Entwicklung und Test einer Meßelektronik zur Arbeitspunktbestimmung am Synchrotron BoDo*, Diplomarbeit, Universität Dortmund **1996**

- [Dunk97] K. Dunkel, O. Walter, K. Wille, *Status of the DELTA Beta-tron Tune Monitoring System*, In den *Proceedings of the 3rd European workshop on beam diagnostics and instrumentation for particle accelerators DIPAC 1997*
- [Eber96] Prof.Dr.rer.nat. W. Eberhard, *Homepage des Institutes für Festkörperforschung „Elektronische Eigenschaften“*, Forschungszentrum Jülich **1996**,
als http://www.kfa-juelich.de/iff/iff_ee.html
- [EPIC99] *Advanced Photon Source EPICS Homepage*, Argonne National Laboratory, Illinois USA **1999**,
als <http://www.aps.anl.gov/Dir:asd/controls/epics/EpicsDocumentation/WWWPages/File:EpicsFrames.html>
- [Föll88] O. Föllinger, *Optimierung dynamischer Systeme*, R. Oldenbourg Verlag München Wien **1988**
- [Hein79] D. Heins, K.H. Matthiessen, J. Pätzold, D. Renken, K. Wille *The Transverse Feedback System at PETRA*, DESY M-79/06 Internal Report, Hamburg **1979**
- [Here87] H.G. Hereward, *Landau damping*, in CERN Accelerator School Advanced Accelerator Physics, Proceedings, Vol. I, CERN 87-03, **1987**
- [HP87] *Text Editors and Processors, HP-UX Concepts and Tutorials, Section: Regular Expressions*, Hewlett-Packard Company, California USA **1987**
- [Isgö96] K. Isgör, *Betrachtung einer Beschleunigeranlage als komplexes System*, Dissertation, Universität Dortmund **1996**
- [Jank94] A. Jankowiak, *Kalibration der DELTA-Strahllagemonitore*, Diplomarbeit, Universität Dortmund **1994**
- [Jank97] A. Jankowiak, *The Closed Orbit Measuring System at the DELTA Synchrotron Radiation Facility*, Particle Accelerator Conference 97, Vancouver, Canada **1997**

- [Kamp96] T. Kamps, *Messung optischer Parameter am Synchrotron BoDo*, Diplomarbeit, Universität Dortmund **1996**
- [Kirc89] T. Kirchheimer, *LIDO, Ein kompakter Speicherring für Röntgentiefenlithographie mit Synchrotronstrahlung*, DELTA Internal Report 89-22, Universität Dortmund **1989**
- [Koha80] R.D. Kohaupt, *Head Tail turbulence and the Transverse PE-TRA Instability*, DESY Report 80/22, DESY Hamburg **1980**.
- [Kozu89] A. Kozubal, D. Kerstiens, J. Hill, L. Dalesio, *Run-time Environment and Applications Tools for the Ground Test Accelerator*, in Proceedings of ICALEPCS, Vancouver, British Columbia, Canada **1989**.
- [Kozu95] A. Kozubal, *State Notation Language and Run-time Sequencer Users Guide, Version 1.9*, Instrumentation and Control Group, Los Alamos National Laboratory **1995**,
als <http://www.atdiv.lanl.gov/Dir/file:aot8/epics/sequencer/snl.html>
- [Krus95] J. Gebhardt, F. Klawonn, R. Kruse, *Fuzzy-Systeme*, Teubner, Stuttgart **1995**
- [Kusk98] R. Bakker, D. Krämer, B. Kuske, P. Kuske, R. Müller, E. Weiherer, *Orbit Response Measurements in the Commissioning of the BESSY II Booster Synchrotron and Storage Ring*, BES-SymbH, Berlin **1998**
- [Lüde94] A. Lüdeke, *Entwicklung und Bau einer Elektronik zur Steuerung des zeitlichen Ablaufs der Injektion in das Synchrotron BoDo*, Diplomarbeit, Universität Dortmund **1994**
- [Lüde97a] A. Lüdeke, *Kalibration der Strahllagemonitor-Elektroniken von BoDo*, DELTA Internal Report 97-05, Universität Dortmund **1997**
- [Lüde97b] A. Lüdeke, *Dokumentation der Applikation BPMApp1 für die Orbit Auslese des Boosters*, DELTA Internal Report 97-06, Universität Dortmund **1997**

- [Lüde98] A. Lüdeke, *Technische Dokumentation des neuen DELTA Timing Systems*, DELTA Internal Report 98-12, Universität Dortmund **1998**
- [Lüde99] A. Lüdeke, *Technische Dokumentation der Datenverarbeitung für das Arbeitspunktmeßsystem am Booster BoDo*, DELTA Internal Report (in Vorbereitung), Universität Dortmund **1999**
- [Meye93] *Meyers Lexikon*, Bibliographisches Institut & P.A. Brockhaus AG, Mannheim **1993**, als <http://www.iicm.edu/meyers>
- [Nauc96] D. Nauck, F. Klawonn, R. Kruse, *Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme*, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden **1996**
- [Open99] *Open Group Desktop Technologies* **1999**, <http://www.opengroup.org/desktop/motif/>
- [Oust95] J.K. Ousterhout, *Tcl und Tk. Entwicklung grafischer Benutzerschnittstellen für das X Window System*, Addison-Wesley **1995**
- [Scha91] U. Schaaf, *Schottky-Diagnose und BTF-Messungen an gekühlten Strahlen im Schwerionen-Speicherring ESR*, GSI-Darmstadt **1991**
- [Schm96] C. Boccard, W. Höfle, H. Jakob, L. Jensen, R. Louwerse, L. Vos, H. Schmickler *Tune Measurements in the SPS as Multicycling Machine*, CERN Geneva, Switzerland **1996**
- [Shne98] B. Shneiderman, *Designing the User-Interface*, Addison Wesley Longman Inc., Reading Massachusetts **1998**, 3rd Edition
- [Simm94] M.J.Simms, *Using State Machines as a Design and Coding Tool*, HP-Journal, Dezember **1994**
- [Sun99] *The Java Homepage at Sun Microsystems* **1999**, <http://java.sun.com>
- [Suzu85a] T. Suzuki, *Synchrotron Resonance driven by Dispersion in RF Cavities*, National Laboratory for High Energy Physics, Japan **1985**, als KEK Preprint 84-21

- [Suzu85b] T. Suzuki, *Synchrotron Resonance driven by Deflecting Modes of RF Cavities*, National Laboratory for High Energy Physics, Japan **1985**, als KEK Preprint 85-1
- [TACO99] *The Home Page of TACO*, European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble, Frankreich **1999**,
als [http://www.esrf.fr/Dir/File: computing/cs/taco/taco.html](http://www.esrf.fr/Dir/File:computing/cs/taco/taco.html)
- [Unse85] K.B. Unser, *Torodial AC and DC Current Transformers for Beam Intensity Measurements*, Atomenergie - Kerntechnik Vol. 47 **1985** No. 1
- [Unse91] K.B. Unser, *The Parametric Current Transformer, a beam current monitor developed for LEP*, AIP Proceedings No.252, Accelerator Instrumentation, third annual workshop, Newport News, VA **1991**
- [Walt98] Olaf Walter, *Ein System zur Messung und Stabilisierung des Arbeitspunktes am Booster-Ring von DELTA*, Diplomarbeit, Universität Dortmund **1998**
- [Will92] K. Wille, *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, Teubner Studienbücher, Stuttgart **1992**
- [Will99] K. Wille, mündliche Mitteilung **1999**
- [XOrg99] *The X Window SystemTM Homepage*, <http://www.x.org> **1999**

Danksagung

Dem ganzen DELTA Team gilt mein Dank für fünf schöne und erfolgreiche Jahre. Herrn Professor Weis danke ich, daß er mich auf meinem Weg zur Entstehung dieser Arbeit unterstützt hat und mir volle Freiheit bei der Wahl meiner Schwerpunkte ließ. Herrn Professor Husmann danke ich für die spontane Bereitschaft, diese Arbeit zu begutachten.

Im besonderen möchte ich ein paar meiner Kollegen danken, deren Mitarbeit ich in den letzten Jahren zu schätzen gelernt habe. Meinen langjährigen Kollegen in der Kontrollgruppe von DELTA Boris Keil und Dirk Zimoch danke ich für die gute Zusammenarbeit. Kai Dunkel danke ich für seinen unermüthlichen Einsatz beim Aufbau der Arbeitspunktmessung am Booster.

Für das Korrekturlesen und die wertvollen Kommentare danke ich meinen Kollegen Kai Dunkel, Dirk Zimoch, Andreas Jankowiak, Andreas Gasper, Detlef Schirmer und vor allem meiner Frau Sabine Loesgen. Claus Biermann danke ich dafür, daß er mein Interesse für Kontrollsysteme weckte.